

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ХАРЬКОВСКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ ГОРОДСКОГО  
ХОЗЯЙСТВА

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ  
ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ**

**«ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ»**

**ЧАСТЬ I**

(для студентов дневной и заочной форм обучения специальности  
7.090603 – «Электротехнические системы электропотребления»)

ХАРЬКОВ – ХНАГХ – 2008

Методические указания к выполнению лабораторных работ по специальности «Электротехнические системы электропотребления» (для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 7.090603 – «Электротехнические системы электропотребления»). Сост.: Гриб О.Г., Довгальук О.Н., Сендерович Г.А., Рожков П.П., Калюжный Д.Н., Омеляненко Г.В., Щербакова П.Г., Колбасин А.И., Натарева И.Г., Блощенко Т.В. – Харьков: ХНАГХ, 2008. – 79 с.

Составители: О.Г. Гриб,  
О.М. Довгальук,  
Г.А. Сендерович,  
П.П. Рожков,  
Д.М. Калюжный,  
Г.В. Омеляненко,  
П.Г. Щербакова,  
А.И. Колбасин,  
И.Г. Натарева,  
Т.В. Блощенко.

Рецензент: проф., д.т.н. В.Г. Ягуп

Утверждено кафедрой  
электроснабжения городов,  
протокол № 9 от 28.05.08.

## СОДЕРЖАНИЕ

1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ.....	5
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1.....	6
АНАЛИЗ И ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК (дисциплина «Электрические станции и подстанции»)	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2.....	13
ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭЕРГИИ В ТРЕХФАЗНОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ (дисциплина «Электроснабжение городов и промышленных предприятий»)	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3.....	23
СИММЕТРИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ТРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ (дисциплина «Электроснабжение и электросбережение»)	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4.....	32
АНАЛИЗ РАБОТЫ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ (дисциплина «Микропроцессорная техника»)	
ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА № 5.....	39
ПРОГРАММА РАССЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РРС-9 (дисциплина «Электрические системы и сети»)	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6.....	47
МОНТАЖ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ТРЕХФАЗНЫХ ТРЕХПРОВОДНЫХ СЕТЯХ (дисциплина «Монтаж и эксплуатация»)	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7.....	53
ИССЛЕДОВАНИЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРОСТЕЙШИХ ТРЕХФАЗНЫХ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЯХ С ИСТОЧНИКАМИ БЕСКОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ (дисциплина «Переходные процессы в энергетических системах»)	

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8.....	61
РАСЧЕТЫ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В КАБЕЛЬНЫХ И ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ (дисциплина «Кабельные и воздушные линии электропередачи»)	
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9.....	71
МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В ПРОСТЕЙШИХ ТРЕХФАЗНЫХ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЯХ (дисциплина «Релейная защита и автоматика»)	

## 1. ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

В процессе подготовки специалистов по специальности “Электротехнические системы электропотребления” по дневной и заочной формам обучения студенты проходят обучения согласно учебному плану, который утверждается Министерством образования Украины, где по основным курсам подготовки предусмотрены лабораторный практикум.

В первой части данных методических указаний приведены указания к лабораторным работам по следующим учебным курсам: «Микропроцессорная техника», «Монтаж и эксплуатация», «Переходные процессы в энергетических системах», «Электрические станции и подстанции», «Электрические системы и сети», «Электроснабжения городов и промышленных предприятий», «Электроснабжение и электросбережение», «Кабельные и воздушные линии электропередачи», «Релейная защита и автоматика».

Данные методические указания предназначены для предоставления студентам методической помощи при подготовке и выполнении лабораторных работ.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

### АНАЛИЗ И ПОСТРОЕНИЕ ГРАФИКОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

(дисциплина «Электрические станции и подстанции»)

**Цель работы:** изучить основные показатели, характеризующие графики нагрузок, способы их расчета и способы построения ступенчатых графиков.

#### 1.1. Краткие теоретические сведения

График нагрузки представляет собой зависимость потребляемой мощности во времени  $P = f(t)$ . В зависимости от средств и способов измерения различают непрерывные и ступенчатые графики нагрузок. Непрерывные графики нагрузок получают с помощью цифровых измерительных комплексов, частота измерения электрических величин которых составляет микросекунды. Ступенчатые графики нагрузок получают путем усреднения потребляемой мощности на протяжении всего времени измерения. Для этого используют счетчики электрической энергии.

В большинстве решаемых задач знать все особенности вида графика нагрузки необязательно. Основные особенности вида графика характеризуются рядом показателей к которым относятся:

1. Максимальная нагрузка  $P_{\text{макс}}$  - наибольшее значение потребляемой мощности за некоторый промежуток времени, обычно за 30 минут.

2. Средняя нагрузка  $P_c = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \cdot \Delta t_i}{T}$ , где  $P_i$  - потребляемая мощность на интервале  $\Delta t_i$ ,  $T = \sum_{i=1}^n \Delta t_i$  - длительность графика нагрузки.

3. Среднеквадратичная нагрузка  $P_{\text{ск}} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n P_i^2 \cdot \Delta t_i}$ .

4. Коэффициент формы  $K_{\text{ф,а}} = P_{\text{ск}} / P_c$ .

5. Коэффициент загрузки графика  $K_{з,г,а} = P_c / P_{\max}$ .
6. Время использования наибольшей нагрузки  $T_{\max} = P_c \cdot T / P_{\max}$ .
7. Время наибольших потерь  $\tau = P_{ск}^2 \cdot T / P_{\max}^2$ .

## 1.2. Описание программного обеспечения

При загрузке программного обеспечения по выполнению лабораторной работы 1 "Анализ и построение графиков электрических нагрузок" появляется окно программы, в котором отображается система координат и таблица (рис. 1.1). Система координат предназначена для отображения графика электрических нагрузок. Таблица предназначена для отображения графика в табличной форме.

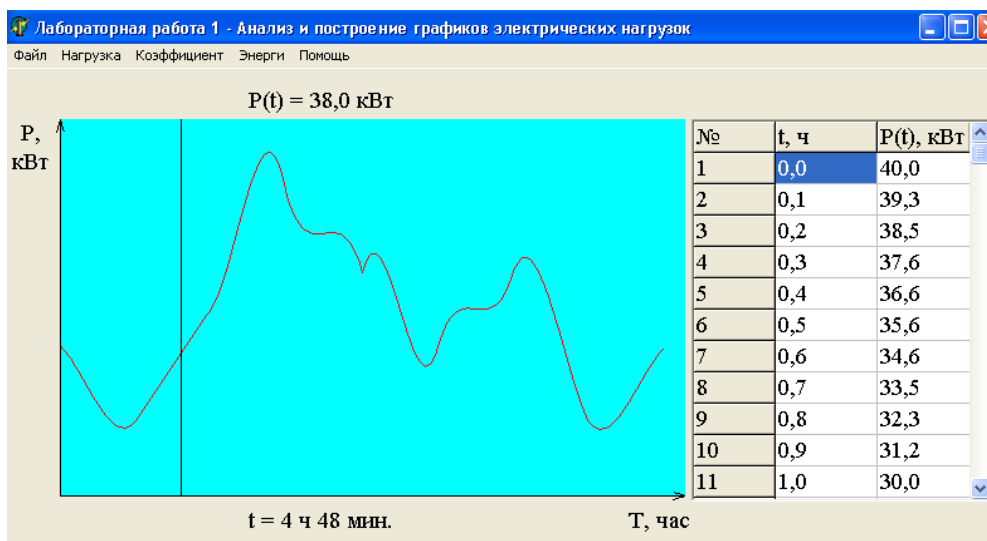


Рис.1.1. Внешний вид лабораторной работы

Программное обеспечение по выполнению лабораторной работы имеет главное меню, которое включает в себя следующие опции:

- "Файл";
- "Нагрузка";
- "Коэффициент";

- "Энергия";
- "Помощь".

Опция "Файл" главного меню содержит три подопции:

- "Открыть". Данная подопция предназначена для загрузки текстового файла с исходными данными. Местонахождение и имя файла указывается преподавателем. При появлении сообщений "Уточните исходные данные" или "Ошибка исходных данных" следует обратиться к преподавателю.
- "Экспорт данных". Данная подопция предназначена для сохранения информации о графике нагрузки в табличной форме в текстовом файле.
- "Выход". Данная подопция предназначена для выхода из программы.

Опция "Нагрузка" главного меню содержит три подопции:

- "Средняя". При выборе данной подопции отображается информация о средней нагрузке.
- "Среднеквадратичная". При выборе данной подопции отображается информация о среднеквадратичной нагрузке.
- "Максимальная". При выборе данной подопции отображается информация о тридцатиминутной максимальной нагрузке.

Опция "Коэффициент" главного меню содержит четыре подопции:

- "Формы". При выборе данной подопции отображается информация о коэффициенте формы.
- "Загрузки графика". При выборе данной подопции отображается информация о коэффициенте загрузки графика.
- "Время использования наибольшей нагрузки". При выборе данной подопции отображается информация о времени использования наибольшей нагрузки.



- "Время наибольших потерь". При выборе данной подопции отображается информация о времени наибольших потерь.

Опция "Энергия" главного меню предназначена для отображения информации об электропотреблении.

Опция "Помощь" главного меню содержит две подопции:

- "Руководство пользователя". При выборе данной подопции отображается информация о программном обеспечении.
- "Методические указания". При выборе данной подопции отображаются краткие методические указания к выполнению лабораторной работы.

После загрузки исходных данных, для работы с графиком нагрузки предусмотрен курсор, который определяет время и соответствующее потребление мощности. Местоположение курсора определяется тремя событиями:

- нажатием левой клавиши мышки;
- нажатием клавиш "<" (перемещение влево) и ">" (перемещение вправо);
- выбором строки в таблице.

### **1.3. Подготовка к лабораторной работе**

Подготовка к лабораторной работе предусматривает: ознакомление с теоретическим материалом по теме лабораторной работы; изучением описания программного обеспечения; домашнюю заготовку таблиц для занесения результатов исследования и расчетов (табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Показатели графиков электрических нагрузок

Наименование	Показатели графиков электрических нагрузок						
	$P_{\text{макс}}$ , кВт	$P_c$ , кВт	$P_{\text{ск}}$ , кВт	$K_{\phi,a}$	$K_{\Sigma,a}$	$T_{\text{макс}}$ , час	$\tau$ , час
Непрерывный график							
Ступенчатый график							
Погрешность							

#### 1.4. Указания по выполнению работы

1. Получить исходные данные на выполнение лабораторной работы у преподавателя. Исходные данные представляют собой текстовый файл «График\_нагрузки\_№X.txt». После этого запустить программное обеспечение по лабораторной работе и загрузить файл исходных данных.

2. Провести анализ графика нагрузки и определить следующие показатели. Результаты занести в табл. 1.1.

3. Определить график электрической нагрузки в табличной форме. Для получения этой информации необходимо воспользоваться подопцией "Экспорт данных" опции «Файл» меню программного обеспечения. При этом размерность таблицы составляет 2 столбца на 241 строку.

4. Построить ступенчатый график нагрузки с временем усреднения ступеней  $t_{\text{уср}} = 1$  час. Среднюю нагрузку каждой ступени определить следующим образом:

$$P_{\text{cmj}} = \frac{1}{t_{\text{уср}}} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot \Delta t.$$

5. Для ступенчатого графика нагрузки определить следующие показатели: максимальную нагрузку  $P_{\text{макс}}$ ; среднюю нагрузку  $P_c$ ; среднеквадратичную нагрузку  $P_{\text{ск}}$ ; коэффициент формы  $K_{\phi,a}$ ; коэффициент загрузки графика  $K_{\varepsilon,a}$ ; время использования наибольшей нагрузки  $T_{\text{макс}}$ ; время наибольших потерь  $\tau$ . Результаты занести в табл. 1.1.

6. Рассчитать погрешность определения максимальной нагрузки  $P_{\text{макс}}$ , средней нагрузки  $P_c$ , среднеквадратичной нагрузки  $P_{\text{ск}}$ , коэффициента формы  $K_{\phi,a}$ , коэффициента загрузки графика  $K_{\varepsilon,a}$ , времени использования наибольшей нагрузки  $T_{\text{макс}}$ , времени наибольших потерь  $\tau$  для ступенчатого графика относительно непрерывного следующим образом:

$$\delta = \frac{K - K'}{100\%},$$

где  $K$  — показатель непрерывного графика электрических нагрузок;  $K'$  — ступенчатого.

Результаты расчета занести в табл. 1.1.

### 1.5. Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

1. цель работы;
2. результаты измерений и расчетов;
3. мгновенный и ступенчатый графики нагрузки;
4. выводы по работе.

## **1.6. Контрольные вопросы**

1. Какое соотношение между максимальной, средней и среднеквадратичной нагрузками?
2. Каким образом получают ступенчатый график электрической нагрузки?
3. Какие основные коэффициенты характеризуют график электрических нагрузок?
4. Что представляет собой максимальная нагрузка?
5. Как определяется коэффициент формы графика нагрузки?
6. Что такое средняя нагрузка?

## **1.7. Литература**

1. Федоров А.А., Ристхейн Э.М. Электроснабжение промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1981.
2. Электроснабжение цеха промышленного предприятия / Под ред. А.П. Титова. – М: Изд-во МЭИ, 1990.
3. Федоров А.А., Каменева В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1979.
4. Козлов В.А. Электроснабжение городов. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2**  
**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭЭРГИИ**  
**В ТРЕХФАЗНОЙ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ**  
(дисциплина «Электроснабжение городов и промышленных предприятий»)

**Цель работы:** исследование процесса повышения качества электрической энергии путем симметрирования трехфазной четырехпроводной сети по нулевой последовательности.

**2.1. Краткие теоретические сведения**

В трехфазных четырехпроводных сетях может иметь место несимметрия напряжений по нулевой последовательности. При её уровне выше нормируемых значений необходимо проводить соответствующие мероприятия по её устранению. Одним из таких мероприятий является симметрирование сети с помощью симметрирующих устройств (СУ). Наибольшее распространения получили СУ с реактивными элементами основанные на компенсации токов нулевой последовательности (компенсационный способ).

На рис. 2.1 показана трехфазная четырехпроводная сеть с несимметричной нагрузкой и СУ нулевой последовательности. Соответствующий выбор проводимостей СУ позволяет создать в нем такой ток нулевой последовательности, который будет противоположен току нулевой последовательности нагрузки.

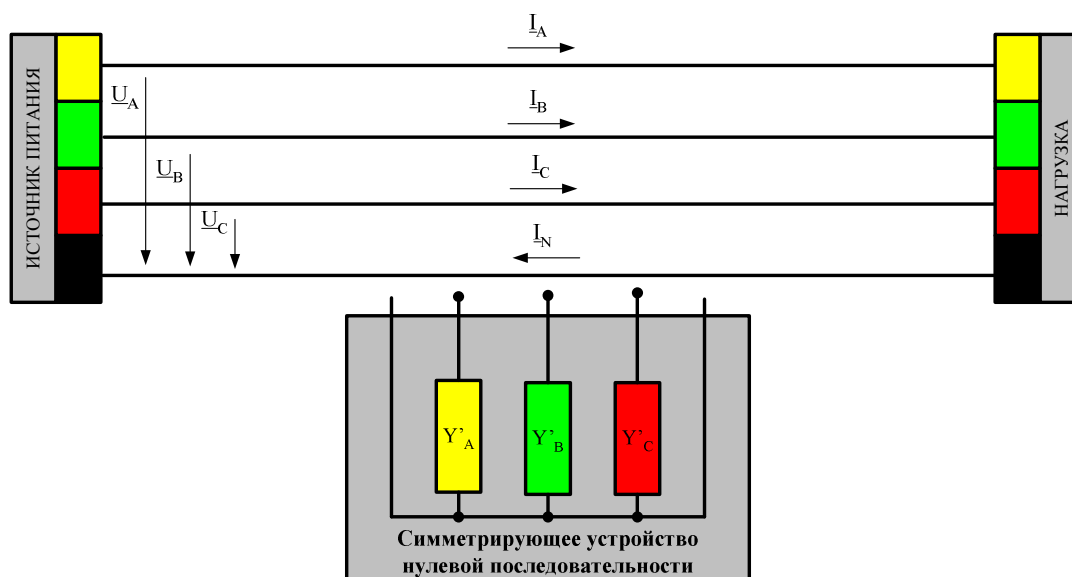


Рис. 2.1 Трехфазная четырехпроводная сеть с СУ нулевой последовательности

Параметры СУ нулевой последовательности, позволяющие скомпенсировать ток нулевой последовательности и соответственно напряжение нулевой последовательности, определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
 Y'_A &= \frac{2j}{U_1} \cdot \text{Im}(I_0) + Y_0; \\
 Y'_B &= -\frac{2j}{U_1} \text{Im}(a \cdot I_0) + Y_0; \\
 Y'_C &= -\frac{2j}{U_1} \text{Im}(a^2 \cdot I_0) + Y_0.
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

где  $U_1$  модуль вектора прямой последовательности напряжения на нагрузке;  $I_0$  - ток нулевой последовательности в сети;  $a = e^{j120}$  - оператор поворота;  $Y_0$  - проводимость, не зависящая от тока нулевой последовательности, поэтому её величина может быть задана произвольно, например,  $Y_0 = 0$ .

Выражение (2.1) получено в предположении, что напряжения симметричны. Это допущение и наличие потребителей включенных на линейное напряжение приводит к остаточной несимметрии напряжений. Для её

устранения процесс симметрирования можно проводить итерационно. При этом погрешность симметрирования будет определяться следующим образом:

$$\delta_C = \frac{I_0^{(N)}}{I_0}, \quad (2.2)$$

где  $I_0$  - ток нулевой последовательности до подключения СУ.  $I_0^{(N)}$  - ток нулевой последовательности после N-го цикла симметрирования.

## 2.2. Описание виртуального лабораторного стенда

Выполнение лабораторной работы проводится на виртуальном лабораторном стенде, который реализован в виде компьютерной программы. Внешний вид стенда представлен на рис. 2.2.

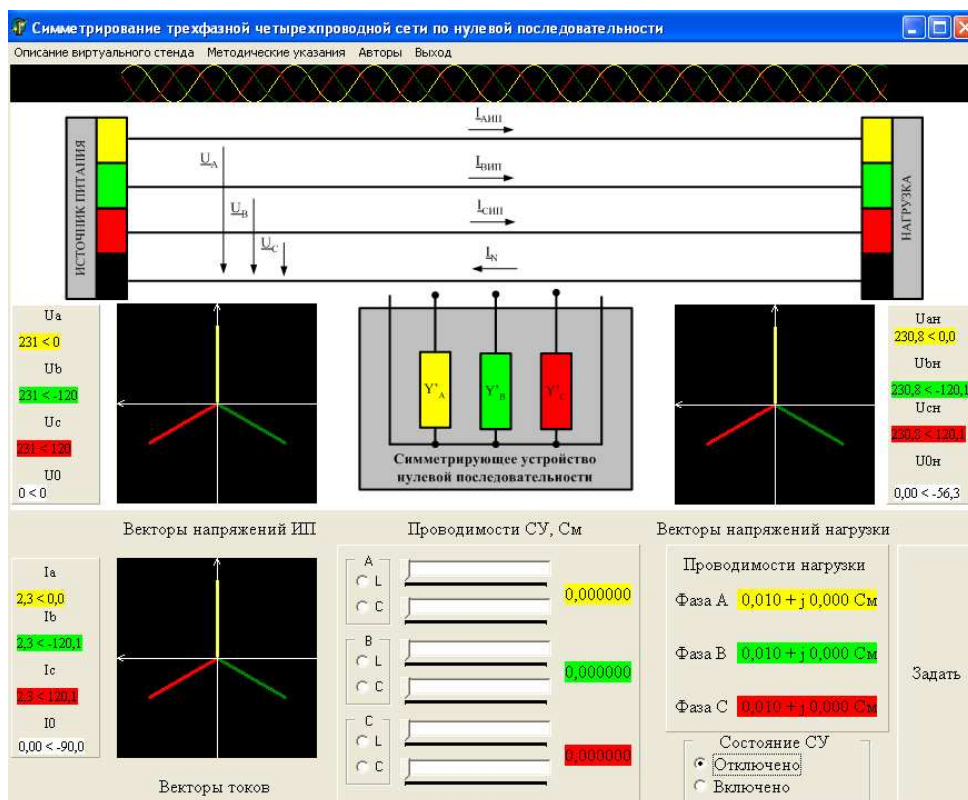
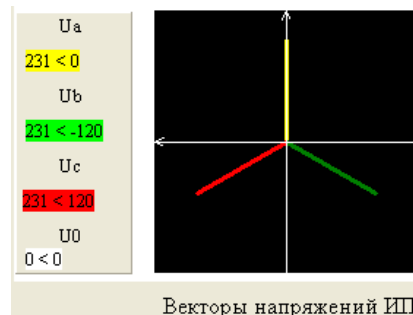


Рис. 2.2 Внешний вид виртуального стенда лабораторной работы

С помощью стенда моделируется режим работы трехфазной четырехпроводной сети. Проводимости фазных проводов и нулевого провода приняты равными  $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \underline{Y}_N = 10 \cdot e^{j0}$  См. Напряжения

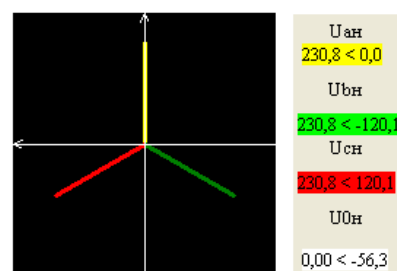


источника питания приняты симметричными с модулями 231 В. Численно и графически напряжения источника питания отображаются на стенде.

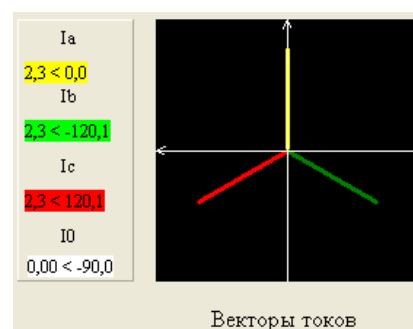
Нагрузка задается с помощью кнопки «Задать». По умолчанию, нагрузка

задается симметричной активной проводимостью фаз с величиной 0,01 См. После нажатия кнопки «Задать» нагрузка определяется случайным образом. Численно она отображается на стенде. Фазные напряжения нагрузки, соответствующие заданной нагрузке, численно и графически также отображаются на стенде.

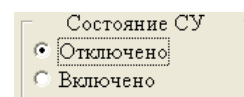
Проводимости нагрузки	
Фаза А	0,010 + j 0,000 См
Фаза В	0,010 + j 0,000 См
Фаза С	0,010 + j 0,000 См



Токи, протекающие по сети от источника питания к нагрузке, также отображаются численно и графически на стенде. Размерность величины токов - Ампер. Величина I0 – соответствует току нулевой последовательности.



Состояние СУ нулевой последовательности регулируется с помощью зависимых переключателей: «Отключено» и «Включено». Положение «Отключено» соответствует состоянию, когда СУ не подключено к сети. «Включено» - СУ подключено к сети. По умолчанию, состояние СУ – «Отключено».





Параметры СУ, в частности его проводимости, определяются с помощью соответствующих зависимых переключателей и регуляторов, которые отображены на стенде под СУ. С помощью зависимых переключателей определяется характер проводимости СУ по каждой фазе (L – индуктивный, С – емкостной характер). С помощью регуляторов определяется величина проводимости СУ каждой фазы. При этом для каждой фазы предусмотрено два регулятора. Один из них изменяет проводимость на уровне размерности  $10^{-3}$  См, второй - на уровне  $10^{-6}$  См с шагом соответственно 0,001 См и 0,000001 См. По умолчанию, характер проводимости СУ не задан. Их значения равны нулю. Для того чтобы приступить к изменению проводимостей СУ необходимо и достаточно выбрать их характер.

### 2.3. Подготовка к лабораторной работе

Подготовка к лабораторной работе предусматривает: ознакомление с теоретическим материалом по теме лабораторной работы; изучением описания виртуального лабораторного стенда; домашнюю заготовку таблиц для занесения параметров режима работы сети (табл. 2.1, 2.3) и расчетных данных (табл. 2.2).

В табл. 2.1:  $|\underline{U}_{0н}|$  - модуль напряжения нулевой последовательности нагрузки;  $|\underline{I}_0|$  - модуль тока нулевой последовательности в сети;  $\underline{U}_{Ан}$ ,  $\underline{U}_{Вн}$  и  $\underline{U}_{Сн}$  - фазные напряжения нагрузки;  $\underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_B$  и  $\underline{I}_C$  - фазные токи, протекающие в сети.

В табл. 2.2:  $|\underline{U}_{1н}|$  - модуль вектора напряжения нагрузки прямой последовательности;  $|\underline{I}_1|$  - модуль вектора тока прямой последовательности;  $K_{U0}$  - коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности;  $K_{I0}$  - коэффициент несимметрии токов по нулевой последовательности;  $Y'_A$ ,  $Y'_B$  и  $Y'_C$  - расчетные значения фазных реактивных проводимостей СУ;  $\delta_C$  - погрешность симметрирования после первого цикла. Величины с символом (1) соответствуют режиму работы сети после первого цикла симметрирования.

В табл. 2.3 указаны величины аналогичные табл. 2.1, но определенные после первого цикла симметрирования.

## 2.4. Порядок выполнения лабораторной работы

Допуском к выполнению лабораторной работы является домашняя подготовка к выполнению работы.

В ходе работы необходимо выполнить пять опытов по симметрированию трехфазной четырехпроводной сети. Все пять опытов должны удовлетворять следующему условию:

$$|\underline{U}_{0н}| > 0,02 \cdot U_{ном}. \quad (2.3)$$

Таблица 2.1 – Параметры режима работы сети до подключения СУ нулевой последовательности

№ опыта	$ \underline{U}_{0H} $ , В	$ \underline{I}_0 $ , А	$\underline{U}_{AH}$ , В	$\underline{U}_{BH}$ , В	$\underline{U}_{CH}$ , В	$\underline{I}_A$ , А	$\underline{I}_B$ , А	$\underline{I}_C$ , А
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Таблица 2.2 – Расчетные данные

№ опыта	$ \underline{U}_{1H} $ , В	$ \underline{I}_1 $ , А	$K_{U0}$ , %.	$K_{I0}$ , %.	$Y'_A$ , См	$Y'_B$ , См	$Y'_C$ , См	$ \delta_C $ , о.е.	$ \underline{U}_{1H}^{(1)} $ , В	$ \underline{I}_1^{(1)} $ , А	$K_{U0}^{(1)}$ , %.	$K_{I0}^{(1)}$ , %.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13

Таблица 2.3 – Параметры режима работы сети после подключения СУ нулевой последовательности

№ опыта	$ \underline{U}_{0H}^{(1)} $ , В	$ \underline{I}_0^{(1)} $ , А	$\underline{U}_{AH}^{(1)}$ , В	$\underline{U}_{BH}^{(1)}$ , В	$\underline{U}_{CH}^{(1)}$ , В	$\underline{I}_{AH}^{(1)}$ , А	$\underline{I}_{BH}^{(1)}$ , А	$\underline{I}_{CH}^{(1)}$ , А
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Т.е. следует производить выбор таких режимов, где несимметрия напряжений по нулевой последовательности будет превышать нормально-допустимые значения.

В рамках каждого опыта необходимо:

1. Произвести измерения параметров режима работы сети при отключенном СУ и занести их в табл. 2.1.
2. Произвести расчет (табл. 2.2):
  - напряжения прямой последовательности нагрузки:

$$\underline{U}_{1H} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{AH} + a \cdot \underline{U}_{BH} + a^2 \cdot \underline{U}_{CH}), \quad (2.4)$$

где  $a = e^{j120}$  – оператор поворота;

- тока прямой последовательности:

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_A + a \cdot \underline{I}_B + a^2 \cdot \underline{I}_C); \quad (2.5)$$

- коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности:

$$K_{U0} = \frac{U_{0H}}{U_{1H}} \cdot 100\%; \quad (2.6)$$

- коэффициента несимметрии токов по нулевой последовательности:

$$K_{I0} = \frac{I_{0H}}{I_1} \cdot 100\%; \quad (2.7)$$

- фазных реактивных проводимостей СУ (2.1);
  - модуля погрешности симметрирования  $\delta_C$  после первого цикла (2.2);
  - напряжения прямой последовательности нагрузки, тока прямой последовательности, коэффициента несимметрии напряжений по нулевой последовательности, коэффициента несимметрии токов по нулевой последовательности после первого цикла симметрирования.
3. Произвести измерения параметров режима работы сети при подключенном СУ и занести их в табл. 2.3.

## 2.5. Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

5. цель работы, схему трехфазной четырехпроводной сети с СУ;
6. результаты измерений и расчетов;
7. векторную диаграмму напряжений нагрузки и токов сети до и после использования СУ нулевой последовательности (как минимум для одного опыта);
8. выводы по работе.

## 2.6. Вопросы

1. В чем заключается принцип симметрирование трехфазной четырехпроводной сети по нулевой последовательности с помощью симметрирующих устройств?
2. Как определяются параметры симметрирующего устройства?
3. Чем вызвана погрешность симметрирования по нулевой последовательности?

4. Что такое коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности? Каким образом он определяется?
5. Каковы нормально и предельно-допустимые значения коэффициента несимметрии по нулевой последовательности?

## **2.7. Литература**

1. Качество электрической энергии в системах электроснабжения: Уч. Пособие / Под редакцией О.Г. Гриба. – Харьков: ХНАГХ, 2006. – 281 с.
2. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электрической энергии на промышленных предприятиях. 4-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
3. ГОСТ 13.109 – 97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск.: ИПК Изд-во стандартов. - 1998. –30 с.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3**  
**СИММЕТРИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ТРЕХПРОВОДНОЙ СЕТИ**  
**(дисциплина «Электроснабжение и электросбережение»)**

**Цель работы:** исследование процесса симметрирования трехфазной трехпроводной сети по обратной последовательности.

**3.1. Краткие теоретические сведения**

В трехфазных трехпроводных сетях может иметь место несимметрия напряжений по обратной последовательности. При её уровне выше нормируемых значений необходимо проводить соответствующие мероприятия по её устранению. Одним из таких мероприятий является симметрирование сети с помощью симметрирующих устройств (СУ). Наибольшее распространения получили СУ с реактивными элементами основанные на компенсации токов обратной последовательности (компенсационный способ).

На рис. 3.1 показана трехфазная трехпроводная сеть с несимметричной нагрузкой и СУ обратной последовательности. Соответствующий выбор проводимостей СУ позволяет создать в нем такой ток обратной последовательности, который будет противоположен току обратной последовательности нагрузки.

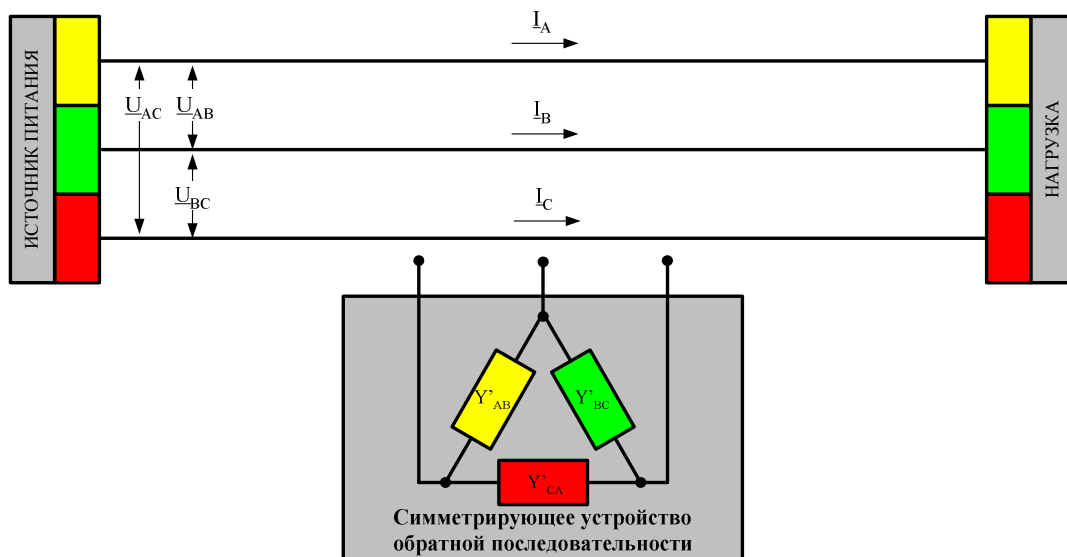


Рис. 3.1 Трёхфазная трёхпроводная сеть с СУ нулевой последовательности

Параметры СУ обратной последовательности, позволяющие скомпенсировать ток обратной последовательности и соответственно напряжение обратной последовательности, определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Y_{AB}'' &= \frac{2j}{3 \cdot U_1} \cdot \operatorname{Im}(a \cdot \underline{I}_2) + Y_0'', \\ Y_{BC}'' &= \frac{2j}{3 \cdot U_1} \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_2) + Y_0'', \\ Y_{CA}'' &= \frac{2j}{3 \cdot U_1} \cdot \operatorname{Im}(a^2 \cdot \underline{I}_2) + Y_0'', \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

где  $U_1$  - модуль вектор прямой последовательности напряжения нагрузки,  $\underline{I}_2$  - ток обратной последовательности в сети,  $a = e^{j120}$  - оператор поворота;  $Y_0''$  - проводимость, не зависящая от тока обратной последовательности, поэтому её величина может быть задана произвольно, например,  $Y_0'' = 0$ .



### 3.2. Описание виртуального лабораторного стенда

Выполнение лабораторной работы проводится на виртуальном лабораторном стенде, который реализован в виде компьютерной программы. Внешний вид стенда представлен на рис. 2.2.

С помощью стенда моделируется режим работы трехфазной трехпроводной сети. Проводимости фазных проводов приняты равными  $\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C = 20 \cdot e^{j0}$  См. Линейные напряжения источника питания приняты симметричными с модулями 400 В. Численно и графически напряжения источника питания отображаются на стенде.

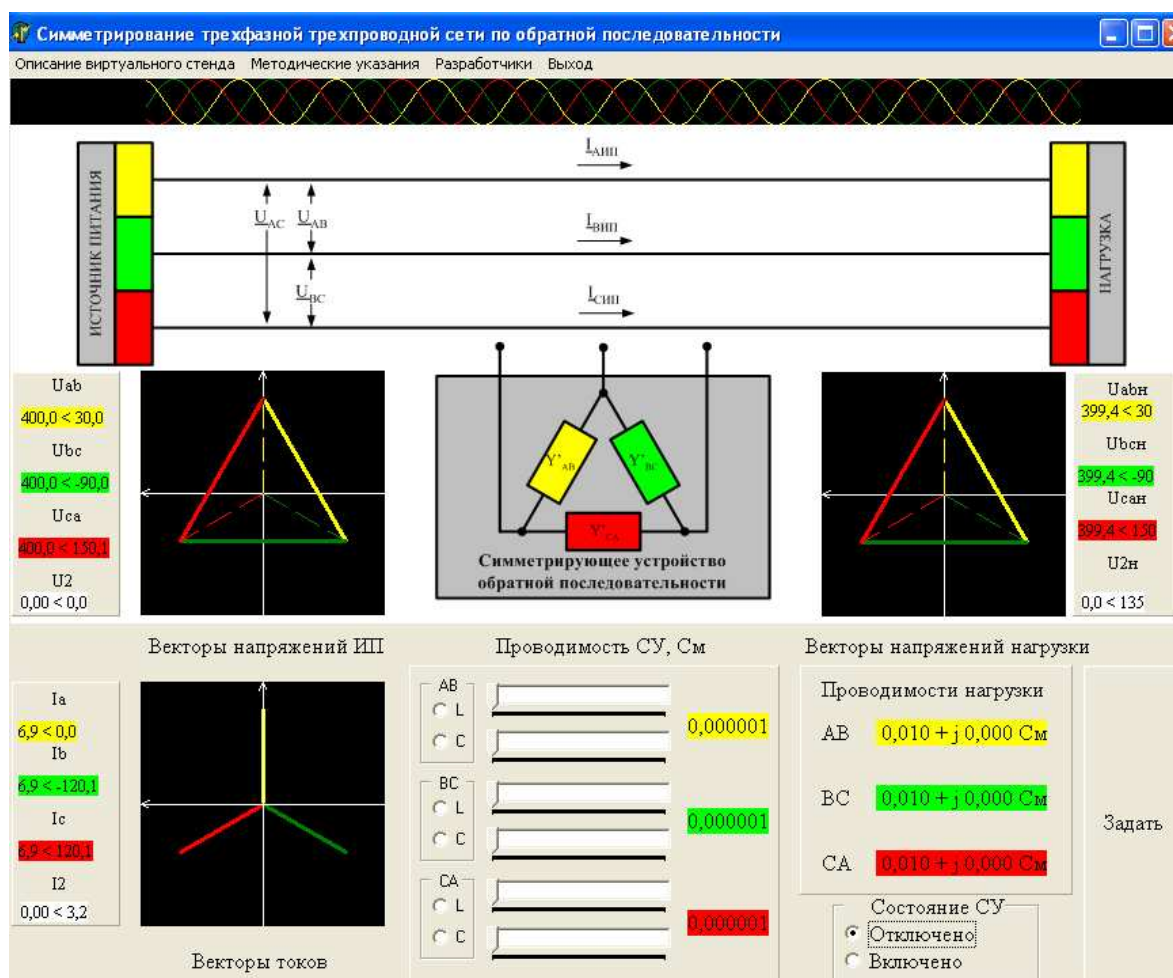
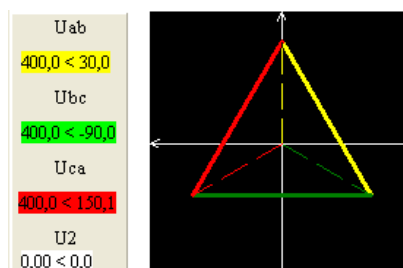


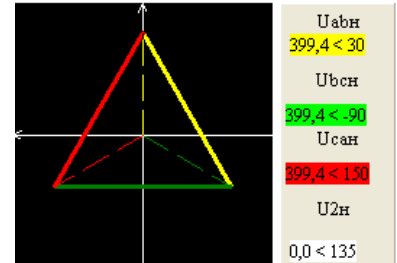
Рис. 3.2 Внешний вид виртуального стенда лабораторной работы

Проводимости нагрузки	
Фаза А	0,010 + j 0,000 См
Фаза В	0,010 + j 0,000 См
Фаза С	0,010 + j 0,000 См

Нагрузка задается с помощью кнопки «Задать». По умолчанию, нагрузка задается симметричной линейной активной проводимостью с

величиной 0,01 См. После нажатия

кнопки «Задать» нагрузка определяется случайным образом. Численно она отображается на стенде. Линейные напряжения нагрузки, соответствующие заданной нагрузке, численно и графически также отображаются на стенде.



Токи, протекающие по сети от источника питания к нагрузке, также отображаются численно и графически на стенде. Размерность величины токов - Ампер. Величина  $I_2$  – соответствует току обратной последовательности.

Состояние СУ обратной последовательности регулируется с помощью зависимых переключателей: «Отключено» и «Включено». Положение «Отключено» соответствует состоянию, когда СУ не подключено к сети. «Включено» - СУ подключено к сети. По умолчанию, состояние СУ – «Отключено».

Состояние СУ

☒ Отключено
 ☐ Включено

Параметры СУ, в частности его проводимости, определяются с помощью соответствующих зависимых переключателей и регуляторов, которые отображены на стенде под СУ. С помощью зависимых переключателей определяется характер каждой линейной проводимости СУ (L – индуктивный, C – емкостной характер). С помощью

Проводимость СУ, См

AB	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0,000001
<input type="radio"/> L	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="radio"/> C	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
BC	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0,000001
<input type="radio"/> L	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="radio"/> C	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
CA	<input type="text"/>	<input type="text"/>	0,000001
<input type="radio"/> L	<input type="text"/>	<input type="text"/>	
<input type="radio"/> C	<input type="text"/>	<input type="text"/>	

регуляторов определяется величина линейных проводимостей СУ. При этом для каждой линейной проводимости СУ предусмотрено два регулятора. Один из них изменяет проводимость на уровне размерности  $10^{-3}$  См, второй - на уровне  $10^{-6}$  См с шагом соответственно 0,001 См и 0,000001 См. По умолчанию, характер проводимости СУ не задан. Их значения равны 0,000001 См. Для того

чтобы приступить к изменению проводимостей СУ необходимо и достаточно выбрать их характер.

### 3.3. Подготовка к лабораторной работе

Подготовка к лабораторной работе предусматривает: ознакомление с теоретическим материалом по теме лабораторной работы; изучение описания виртуального лабораторного стенда; домашнюю заготовку таблиц для занесения параметров режима работы сети (табл. 3.1, 3.3) и расчетных данных (табл. 3.2).

В табл. 3.1:  $|\underline{U}_{2n}|$  - модуль напряжения обратной последовательности нагрузки;  $|\underline{I}_2|$  - модуль тока обратной последовательности в сети;  $\underline{U}_{ABn}$ ,  $\underline{U}_{BCn}$  и  $\underline{U}_{CAn}$  - линейные напряжения нагрузки;  $\underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_B$  и  $\underline{I}_C$  - фазные токи, протекающие в сети.

В табл. 3.2:  $|\underline{U}_{1n}|$  - модуль вектора линейного напряжения нагрузки прямой последовательности;  $|\underline{I}_1|$  - модуль вектора тока прямой последовательности;  $K_{U2}$  - коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности;  $K_{I2}$  - коэффициент несимметрии токов по обратной последовательности;  $Y''_{AB}$ ,  $Y''_{BC}$  и  $Y''_{CA}$  - расчетные значения линейных реактивных проводимостей СУ;

В табл. 3.3 указаны величины аналогичные величинам табл. 3.1, но после первого цикла симметрирования.

Таблица 3.1 – Параметры режима работы сети до подключения СУ обратной последовательности

№ опыта	$ \underline{U}_{2H} , \text{В}$	$ \underline{I}_2 , \text{А}$	$\underline{U}_{ABH}, \text{В}$	$\underline{U}_{BCH}, \text{В}$	$\underline{U}_{CAH}, \text{В}$	$\underline{I}_A, \text{А}$	$\underline{I}_B, \text{А}$	$\underline{I}_C, \text{А}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Таблица 3.2 – Расчетные данные

№ опыта	$ \underline{U}_{1H} , \text{В}$	$ \underline{I}_1 , \text{А}$	$K_{U2}, \%$	$K_{I2}, \%$	$Y''_{AB}, \text{См}$	$Y''_{BC}, \text{См}$	$Y''_{CA}, \text{См}$	$ \underline{U}_{1H}^{(1)} , \text{В}$	$ \underline{I}_1^{(1)} , \text{А}$	$K_{U2}^{(1)}, \%$	$K_{I2}^{(1)}, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Таблица 3.3 – Параметры режима работы сети после подключения СУ обратной последовательности

№ опыта	$ \underline{U}_{2H}^{(1)} , \text{В}$	$ \underline{I}_2^{(1)} , \text{А}$	$\underline{U}_{ABH}^{(1)}, \text{В}$	$\underline{U}_{BCH}^{(1)}, \text{В}$	$\underline{U}_{CAH}^{(1)}, \text{В}$	$\underline{I}_A^{(1)}, \text{А}$	$\underline{I}_B^{(1)}, \text{А}$	$\underline{I}_C^{(1)}, \text{А}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9

### 3.4. Порядок выполнения лабораторной работы

Допуском к выполнению лабораторной работы является домашняя подготовка к выполнению работы.

В ходе работы необходимо выполнить пять опытов по симметрированию трехфазной трехпроводной сети. Все пять опытов должны удовлетворять следующему условию:

$$|\underline{U}_{2n}| > 0,02 \cdot U_{ном}.$$

Т.е. следует производить выбор таких режимов, где несимметрия напряжений по обратной последовательности будет превышать нормально-допустимые значения.

В рамках каждого опыта необходимо:

4. Произвести измерения параметров режима работы сети при отключенном СУ и занести их в табл. 3.1.
5. Произвести расчет (табл. 3.2):
  - линейного напряжения прямой последовательности нагрузки:

$$\underline{U}_{1n} = \frac{1}{3} \cdot (\underline{U}_{ABn} + a \cdot \underline{U}_{BCn} + a^2 \cdot \underline{U}_{CAn}),$$

- тока прямой последовательности:

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{3} \cdot (\underline{I}_A + a \cdot \underline{I}_B + a^2 \cdot \underline{I}_C);$$

- коэффициента несимметрии напряжений по обратной последовательности:

$$K_{U2} = \frac{U_{2н}}{U_1} \cdot 100\% ;$$

- коэффициента несимметрии токов по обратной последовательности:

$$K_{I2} = \frac{I_{2н}}{I_1} \cdot 100\% ;$$

- линейных реактивных проводимостей СУ (3.1);

6. Произвести измерения параметров режима работы сети при подключенном СУ и занести их в табл. 3.3.

### 3.5. Оформление отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

9. цель работы, схему трехфазной трехпроводной сети с СУ;
10. результаты измерений и расчетов;
11. векторную диаграмму напряжений нагрузки и токов сети до и после использования СУ обратной последовательности (как минимум для одного опыта);
12. выводы по работе.

### 3.6. Вопросы

6. В чем заключается принцип симметрирование трехфазной трехпроводной сети по обратной последовательности с помощью симметрирующих устройств?
7. Как определяются параметры симметрирующего устройства?

8. Что такое коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности? Каким образом он определяется?
9. Причины возникновения несимметрии напряжений?
10. Каковы нормально и предельно-допустимые значения коэффициента несимметрии по обратной последовательности?

### **3.7. Литература**

4. Качество электрической энергии в системах электроснабжения: Уч. Пособие / Под редакцией О.Г. Гриба. – Харьков: ХНАГХ, 2006. – 281 с.
5. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электрической энергии на промышленных предприятиях. 4-е изд., перераб. И доп. – М.: Энергоатомиздат, 2005. – 261 с.
6. ГОСТ 13.109 – 97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Минск.: ИПК Изд-во стандартов. - 1998. –30 с.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

## АНАЛИЗ РАБОТЫ МИКРОПРОЦЕССОРНОЙ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

(дисциплина «Микропроцессорная техника»)

**Цель работы:** исследование работы микропроцессорной системы учета электроэнергии в трехфазных четырехпроводных сетях при различных способах подключения счетчиков.

### 4.1. Краткие теоретические сведения

В трехфазных четырехпроводных сетях учет электроэнергии производится с помощью счетчика электроэнергии, подключенного по трехэлементной схеме [1, 2]. В этом случае измеряемая мощность определяется следующим образом:

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C \quad (4.1)$$

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C ,$$

где  $U_i$  ( $i = A, B, C$ ) – значения модулей фазных напряжений;  $I_i$  ( $i = A, B, C$ ) – значения модулей фазных токов;  $\varphi_i$  ( $i = A, B, C$ ) – угол смещения между током и напряжением, определяемый характером нагрузки.

Данный подход предполагает измерение шести электрических величин: трех фазных напряжений и трех фазных токов. В случае правильной схемы подключения счетчика, которая, в общем виде, показана на рис.4.1, учет электроэнергии производится корректно. При подключении счетчика по схеме отличной от схемы рис.4.1 в большинстве случаев учет электроэнергии не соответствует действительному и подлежит корректировке. На практике



данный факт учитывается путем пересчета показаний счетчика электроэнергии по следующему выражению:

$$W_o = W \cdot K, \quad (4.2)$$

где  $W_o$  - действительное потребление электроэнергии;  $W$  - показания счетчика электроэнергии;  $F$  – расчетный коэффициент, зависящий от схемы подключения.

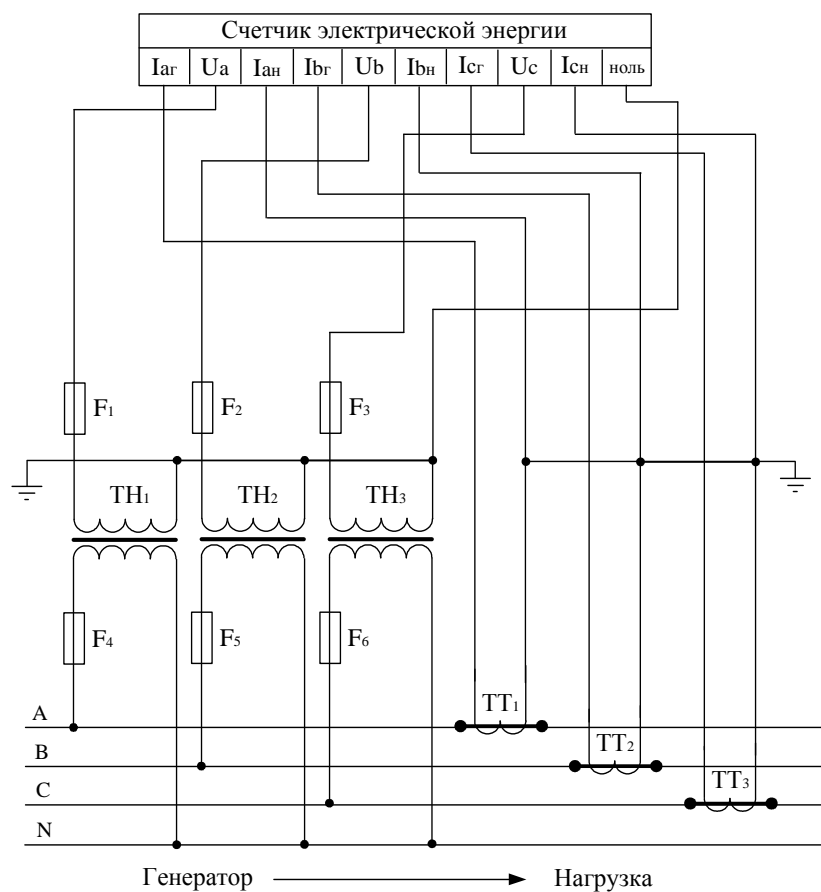


Рис. 4.1 – Схема подключения счетчика электрической энергии к трехфазной четырехпроводной сети

#### 4.4. Описание виртуального лабораторного стенда

Выполнение лабораторной работы проводится на виртуальном лабораторном стенде, который реализован в виде компьютерной программы. Внешний вид стенда представлен на рис. 4.2.

С помощью стенда можно смоделировать любое подключение счетчика электроэнергии к трехфазной четырехпроводной сети, ограниченное следующими допущениями:

- обрыв двух и более измерительных каналов (проводов) напряжения или тока маловероятное событие;
- подключение одноименных потенциалов напряжения и токов к счетчику электроэнергии также маловероятные события.



Рис. 4.2 Внешний вид виртуального стенда лабораторной работы

Панель **управления** лабораторного стенда позволяет выполнять следующие операции:

- «соединить» - соединять выводы измерительных трансформаторов с входами счетчика электроэнергии;
- «разъединить» - создавать обрыв измерительного канала (провода) по цепям напряжения и тока;
- «восстановить» - ликвидировать обрыв измерительного канала (провода) по цепям напряжения и тока;
- «удалить» - удалит соединение по указанному измерительному каналу (проводу).

Панель **сеть** позволяет выбрать электрическую сеть и соответственно установит способ учета электроэнергии:

- «4-х проводная сеть» - измерение электроэнергии в трехфазной четырехпроводной сети с помощью трехэлементного счетчика;
- «3-х проводная сеть» - измерение электроэнергии в трехфазной трехпроводной сети с помощью двухэлементного счетчика.

Панель **ввод данных** позволяет задать параметры режима первичной сети, в частности фазные напряжения и токи, а также её номинальное напряжение.

Кнопка **«Рассчитать»** приводит к моделированию работы счетчика электроэнергии согласно заданной схеме подключения.

Кнопка **«Сбросить параметры»** приводит к сбросу всех заданных и выбранных подключений, а также прекращению моделирования работы счетчика электроэнергии.

Кроме вышеописанных панелей на виртуальном стенде отображаются векторные диаграммы токов и напряжений, имеющих место на обмотках счетчика электроэнергии. Значения мощностей отдельно по фазам и суммарная трехфазная мощность, передаваемая по сети, и измеряемая счетчиком электроэнергии. Значения расчетных коэффициентов по активной, реактивной и полной мощностям.

### 4.3. Подготовка к лабораторной работе

Подготовка к лабораторной работе предусматривает: ознакомление с теоретическим материалом по теме лабораторной работы; изучением описания виртуального лабораторного стенда; домашнюю заготовку таблиц для занесения результатов измерений (табл. 4.1). В табл. 4.1  $P_i$  ( $i = A, B, C$ ) – измеряемая счетчиком электроэнергии фазная активная мощность.  $Q_i$  ( $i = A, B, C$ ) – измеряемая счетчиком электроэнергии фазная реактивная мощность.  $S_i$  ( $i = A, B, C$ ) – измеряемая счетчиком электроэнергии фазная полная мощность.  $P$ ,  $Q$  и  $S$  – суммарные трехфазные активная, реактивная и полная мощности измеряемые счетчиком электроэнергии.  $K_i$  ( $i = P, Q, S$ ) – соответствующие расчетные коэффициенты для суммарной трехфазной мощности.

### 4.4. Порядок выполнения лабораторной работы

Допуском к выполнению лабораторной работы является домашняя подготовка к выполнению работы.

В ходе лабораторной работы необходимо выполнить десять опытов, среди которых обязательное подключение счетчика электроэнергии по схеме, представленной на рис.4.1, и девять опытов с произвольными подключениями.

В рамках каждого опыта необходимо:

1. Записать в табл. 4.1 значения измеряемых мощностей по каждому элементу, суммарную трехфазную мощность и расчетные коэффициенты.
2. Построить векторные диаграммы токов и напряжений, характеризующие каждую схему подключения (табл. 4.1)

Таблица 4.1 – Измеряемые мощности и расчетные коэффициенты

Схема	$P_A$ , Вт	$P_B$ , Вт	$P_C$ , Вт	$P$ , Вт	$K_P$	$Q_A$ , вар	$Q_B$ , вар	$Q_C$ , вар	$Q$ , вар	$K_Q$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Продолжение табл. 4.1

$s_A$ , ВА	$s_B$ , ВА	$s_C$ , ВА	$s$ , ВА	$K_s$	Векторная диаграмма токов и напряжений
12	13	14	15	16	17

#### **4.5. Оформление отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

1. Цель работы, схему подключения счетчика к трехфазной четырехпроводной сети;
2. Результаты измерений;
3. Векторные диаграммы напряжений и токов по каждой схеме подключения;
4. Выводы по работе.

#### **4.6. Вопросы**

1. В чем заключается способ учета электрической энергии в трехфазной четырехпроводной сети?
2. Изобразите правильную схему подключения счетчика электроэнергии.
3. Каким образом производят корректировку показаний счетчика электроэнергии при неправильной схеме подключения?
4. Для чего используют корректирующий коэффициент и каким образом он определяется?
5. Дайте характеристику векторной диаграмме токов и напряжений при правильной схеме подключения счетчика электроэнергии.
6. Дайте характеристику векторной диаграмме токов и напряжений одной из неправильных схем подключения счетчика электроэнергии.

#### **2.7. Литература**

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М., «Высш. школа», 1973.
2. Вострокнутов Н.Г. Электрические счетчики и их эксплуатация. М. 1947.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РОБОТА № 5**  
**ПРОГРАММА РАССЧЕТА УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ**  
**ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РРС-9**  
(дисциплина «Электрические системы и сети»)

**Целью работы:** является ознакомление с итерационными методами расчета установившихся режимов сети на примере применения метода Зейделя в учебной программе РРС-9, разработанной на кафедре электроснабжения городов ХНАГХ.

**5.1. Общие методические указания**

Математическую модель для расчета установившихся режимов электрической сети, составленную по методу узловых напряжений, можно представить матричным уравнением

$$\bar{Y}_1 \cdot \bar{U} = \bar{I} + \bar{Y}_B \cdot U_B, \quad (5.1)$$

где  $\bar{Y}_1 = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1n} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1} & y_{n2} & \dots & y_{nn} \end{pmatrix}$  – матрица взаимных проводимостей;

$$\bar{U} = \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \dots \\ U_n \end{pmatrix} \text{ – матрица узловых напряжений;}$$

$$\bar{I} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \dots \\ I_n \end{pmatrix} \text{ – матрица узловых токов;}$$

$U_B$  – напряжение в базисном узле.

$$\bar{Y}_B = \begin{pmatrix} y_{1B} \\ y_{2B} \\ \dots \\ y_{nB} \end{pmatrix} - \text{матрица базисных проводимостей};$$

Решение уравнения (5.1) для отдельно взятого  $i$ -го узла можно записать в виде

$$\underline{U}_i = \frac{\underline{I}_i + \sum_{j=1}^N y_{i,j} \cdot \underline{U}_j}{y_{i,i}}, \quad (5.2)$$

где  $y_{i,j}, y_{i,i}$  – взаимные и собственные проводимости  $i$ -го узла.

При задании нагрузки в узлах мощностями  $P_i + jQ_i$  уравнения (5.1) и (5.2) являются нелинейными по причине того, что токи в узлах  $\underline{I}_i$ , являющиеся аргументами в этих уравнениях, зависят от напряжений  $U_i$ , которые рассчитываются в качестве функций:

$$\underline{I}_i = \frac{S_i^*}{U_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{U_i' - jU_i''} = \frac{P_i \cdot U_i' + jQ_i \cdot U_i''}{U_i^2} - j \frac{P_i \cdot U_i'' - jQ_i \cdot U_i'}{U_i^2}. \quad (5.3)$$

## 5.2. Блок-схема алгоритма расчета установившегося режима методом Зейделя

Блок-схема приведена на рис. 5.1.

*Исходные данные:*

$N$  – число узлов без базисного;

$M$  – число ветвей;

$NB$  – число базисных узлов;

$U_B' (nB), U_B'' (nB)$  – вещественная и мнимая составляющие напряжений в базисных узлах;



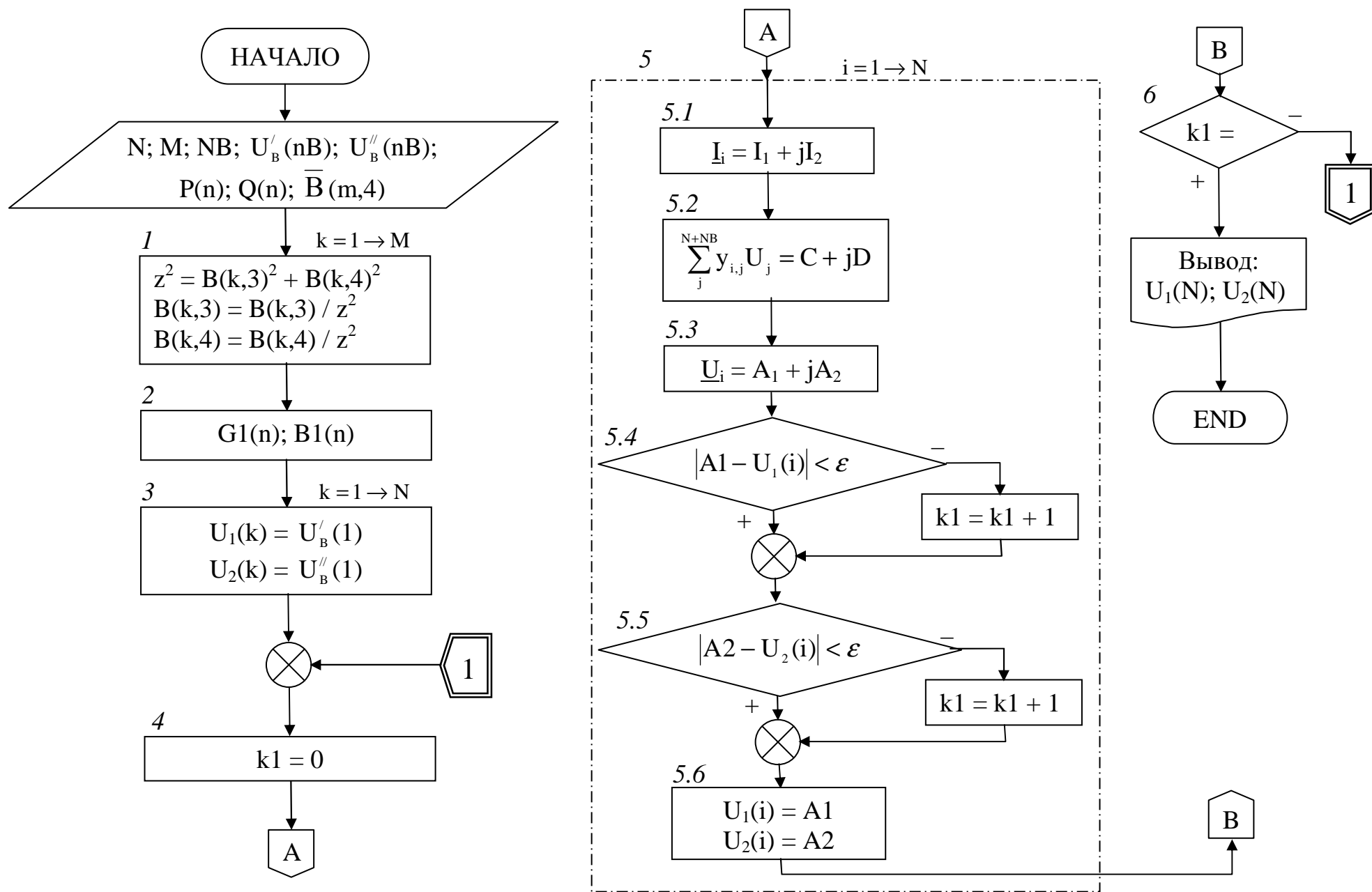


Рис. 5.1 Блок-схема алгоритма расчета установившегося режима методом

$P(n)$ ,  $Q(n)$  – активная и реактивная нагрузки в узлах;

$\overline{B}(m, 4)$  – матрица конфигурации сети.

1. *Блок пересчета сопротивлений ветвей в проводимости.* Комплексные взаимные проводимости определяются путем перебора ветвей по формуле

$$y = \frac{1}{r + jx} = \frac{r}{r^2 + x^2} - j \frac{x}{r^2 + x^2} = g - jb. \quad (5.4)$$

2. *Блок формирования собственных проводимостей.* Собственная проводимость  $i$ -го узла рассчитывается путем суммирования проводимостей ветвей, которые подключены к нему.

$$y_{i,i} = \sum_{j=1}^N y_{i,j} \quad (5.5)$$

В формуле (5.5) значения взаимных проводимостей с узлами, связь с которыми отсутствует, приняты нулевыми ( $y_{i,j} = 0$ ).

3. *Блок задания начальных условий итерационного процесса.* В качестве начальных условий в узлах сети принимаются напряжения, равные напряжению в базисном узле.

4. *Обнуление счетчика счетчик узлов  $k1$ ,* в которых итерационный процесс по расчету напряжения не сошелся.  $k1$  – критерий сходимости. Если при окончании итерации остается  $k1 = 0$ , расчет закончен.

5. *Блок расчета по методу Зейделя.* Расчет производится для каждого узла в цикле  $i$  от 1 до  $N$ .

5.1. Расчет узловых токов  $\underline{I}_i$  по формуле (5.3).

5.2. Вычисление  $\sum_{j=1}^N y_{i,j} \cdot \underline{U}_j$ .

5.3. Расчет напряжений в узлах  $\underline{U}_i$  по формуле (5.2).

5.4. Определение сходимости вещественной части напряжения  $U_1$ .

5.5. Определение сходимости мнимой части напряжения  $U_2$ .

5.6. Присвоение новых значений напряжению.

6. Определение сходимости.

### 5.3. Домашняя подготовка к выполнению лабораторной работы

**5.3.1.** Освоить принцип реализации метода Зейделя в блок-схеме программы PPC-9.

**5.3.2.** Составить таблицу для заполнения матрицы конфигурации сети  $\bar{B}(m, 4)$ . Схема электрической сети принимается по заданию преподавателя. В качестве примера рассмотрим составление матрицы для схемы, приведенной на рис. 5.2. Две электрические подстанции ПС1, ПС2 получают питание от центра

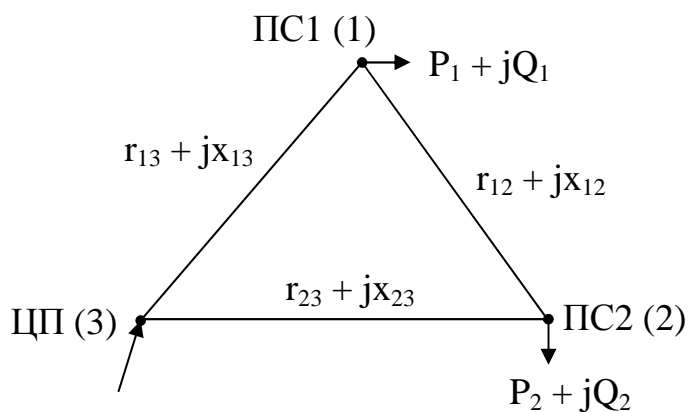


Рис. 5.2. Схема электрической сети

питания ЦП. Принимаем расположение базисного узла в ЦП и обозначаем его под №3: в программе PPC-9 базисные узлы задают последними номерами.

Конфигурацию сети заносим в табл. 5.1. Начало и конец ветвей выбирают произвольно. Если направления

мощностей, полученных в результате расчета, не будут совпадать с выбранным направлением ветвей, то они будут распечатаны отрицательными.

**5.3.3.** Составить таблицу мощности нагрузок в узлах. Для рассматриваемого примера см. табл. 5.2.

Выполнение требований по домашней подготовке является допуском к работе на компьютере.

Таблица 5.1. Конфигурация сети

Номер ветви	Смежные узлы		Сопротивления ветвей	
	Начало ветви	Конец ветви	$r$ , Ом	$x$ , Ом
1	3	1	$r_{13}$	$x_{13}$
2	3	2	$r_{23}$	$x_{23}$
3	1	2	$r_{12}$	$x_{12}$

Таблица 5.2. Мощность нагрузок в узлах

Мощность нагрузки в узле	Номер узла	
	1	2
$P$ , МВт	$P_1$	$P_2$
$Q$ , мвар	$Q_1$	$Q_2$

#### 5.4. Порядок выполнения работы

Работа выполняется на компьютере. Исходные данные вводятся по системе диалога компьютер-оператор. При вводе информации следует обратить внимание на следующие особенности программы РРС-9:

- если запрашиваются значения нескольких параметров, то их следует вводить через запятую;
- в числовых значениях используется десятичная точка;
- на вопрос о количестве узлов требуется указывать количество без базисного узла;
- мнимую составляющую напряжения в базисных узлах рекомендуется принять, равной нулю;
- нумерация ветвей вводится автоматически.

## 5.5. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 1) цель работы и схему сети;
- 2) распечатку исходных данных и результатов расчета;
- 3) схему замещения с нанесенными на нее параметрами режимов, расчет которых выполнен по заданию преподавателя.

## 5.6. Методические указания по проведению анализа результатов расчета режимов

Анализ результатов расчетов следует производить путем нанесения параметров расчетного режима на схему замещения (рис. 5.3).

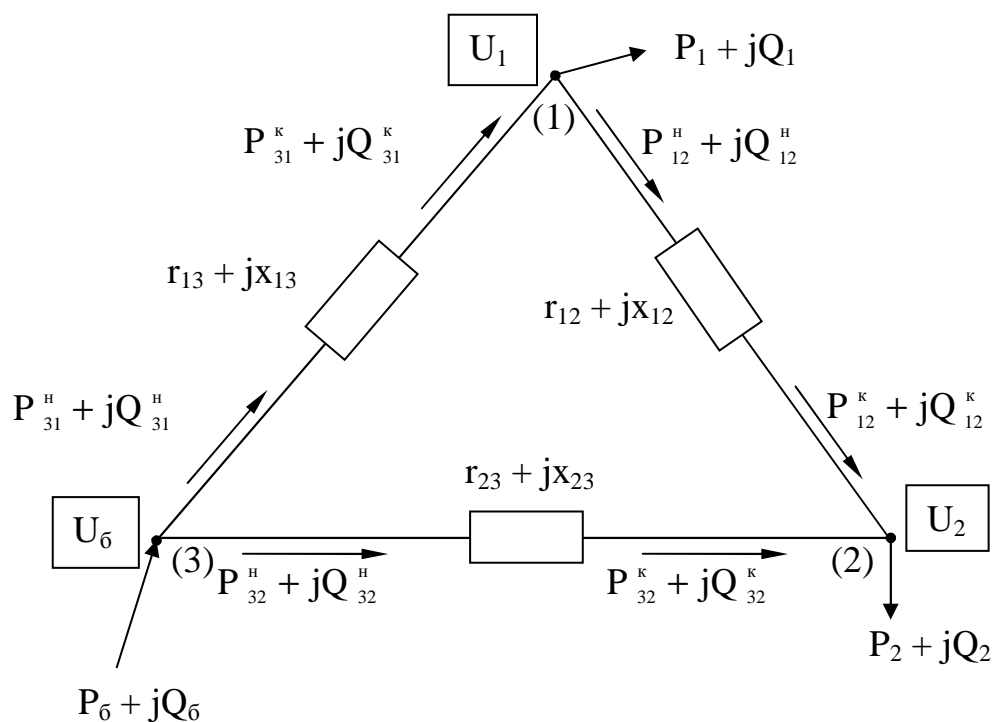


Рис. 5.3. Расчет режима электрической сети

### **5.7. Контрольные вопросы**

1. Что такое итерация?
2. Какие итерационные методы расчета Вы знаете?
3. Условие сходимости метода простых итераций.
4. За счет чего метод Зейделя имеет лучшую сходимость, чем метод простых итераций?
5. Что такое взаимная и собственная проводимости?
6. Матрица конфигурации сети  $\bar{B}(n, 4)$ .
7. Как определяется сходимость в программе РРС-9?

### **5.8. Литература**

1. Электрические системы. Электрические расчеты, программирование и оптимизация. Под ред. В.А. Веникова. – М. Высшая школа, 1973.
2. Электрические системы / Н.В. Буслова, В.Н. Винославский, Г.И. Денисенко, В.С. Перхач; под ред. Г.И. Денисенко. – К. Вища школа, 1986.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6**  
**МОНТАЖ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СЧЕТЧИКОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В**  
**ТРЕХФАЗНЫХ ТРЕХПРОВОДНЫХ СЕТЯХ**  
(дисциплина «Монтаж и эксплуатация»)

**Цель работы:** исследование учета электроэнергии в трехфазных трехпроводных сетях при различных способах подключения счетчиков.

**6.1. Краткие теоретические сведения**

В трехфазных трехпроводных сетях учет электроэнергии производится с помощью счетчика электроэнергии, подключенного по двухэлементной схеме [1, 2]. В этом случае измеряемая мощность определяется следующим образом:

$$P = P_I + P_{II} = U_I I_I \cos(\varphi_{U_I I_I}) + U_{II} I_{II} \cos(\varphi_{U_{II} I_{II}}); \quad (6.1)$$

$$Q = Q_I + Q_{II} = U_I I_I \sin \varphi_I + U_{II} I_{II} \sin \varphi_{II},$$

где  $U_i$  ( $i = I, II$ ) – значения модулей линейных напряжений, измеряемые соответствующими элементами;  $I_i$  ( $i = I, II$ ) – значения модулей фазных токов, измеряемые соответствующими элементами;  $\varphi_{U_i I_i}$  ( $i = I, II$ ) – угол между током и напряжением одноименных элементов. Как правило, в практике эксплуатации, в качестве линейных напряжений I-го элемента используется напряжение  $U_{AB}$ , в качестве II-го элемента – напряжение  $U_{CB}$ . В качестве тока I-го элемента используют ток  $I_A$ , в качестве тока II-го элемента –  $I_C$ .

Данный метод предполагает измерение четырех электрических величин: двух линейных напряжений и двух фазных токов. В случае правильной схемы подключения счетчика, которая, в общем виде, показана на рис.6.1, учет

электроэнергии производится корректно. При подключении счетчика по схеме отличной от схемы рис.6.1 в большинстве случаев учет электроэнергии не соответствует действительному и подлежит корректировке. На практике данный факт учитывается путем пересчета показаний счетчика электроэнергии по следующему выражению:

$$W_o = W \cdot K, \quad (6.2)$$

где  $W_o$  - действительное потребление электроэнергии;  $W$  - показания счетчика электроэнергии;  $F$  – расчетный коэффициент, зависящий от схемы подключения.

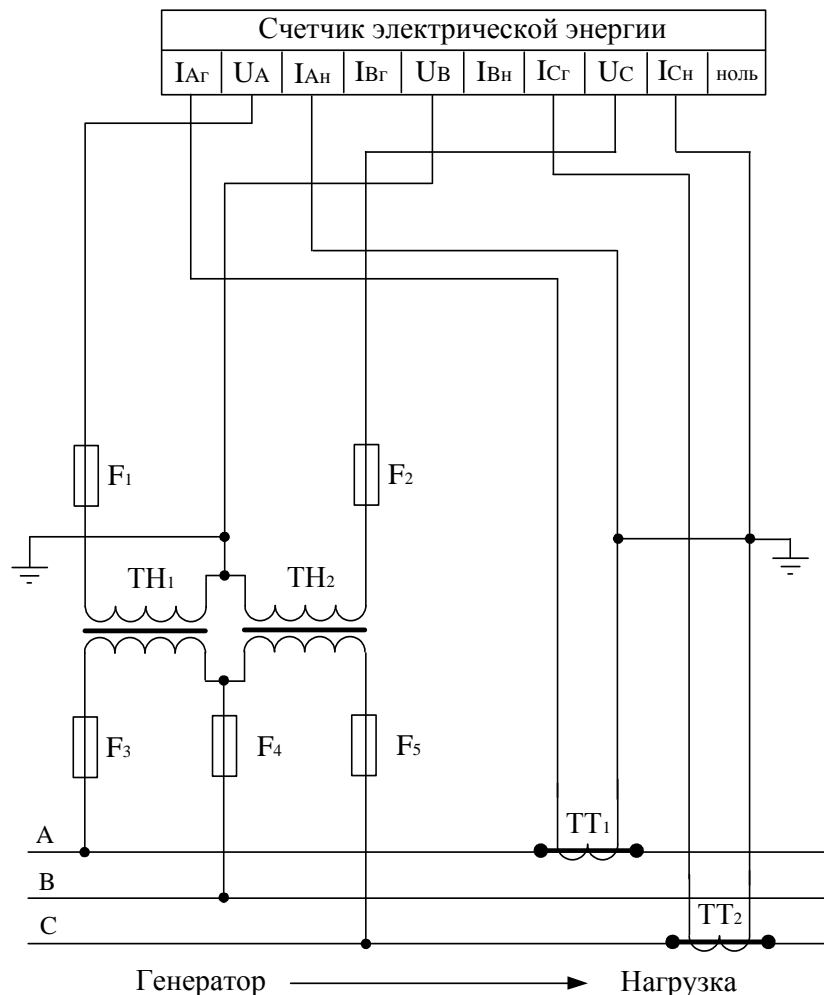


Рис. 6.1 – Схема подключения счетчика электрической энергии к трехфазной трехпроводной сети



## 6.2. Описание виртуального лабораторного стенда

Выполнение лабораторной работы проводится на виртуальном лабораторном стенде, который реализован в виде компьютерной программы. Внешний вид стенда представлен на рис. 6.2.

С помощью стенда можно смоделировать любое подключение счетчика электроэнергии к трехфазной трехпроводной сети, ограниченное следующими допущениями:

- обрыв двух и более измерительных каналов (проводов) напряжения или тока маловероятное событие;
- подключение одноименных потенциалов напряжения и токов к счетчику электроэнергии также маловероятные события.



Рис. 6.2. Внешний вид виртуального стенда лабораторной работы

Панель **управления** лабораторного стенда позволяет выполнять следующие операции:

- «соединить» - соединять выводы измерительных трансформаторов с входами счетчика электроэнергии;
- «разъединить» - создавать обрыв измерительного канала (провода) по цепям напряжения и тока;
- «восстановить» - ликвидировать обрыв измерительного канала (провода) по цепям напряжения и тока;
- «удалить» - удалит соединение по указанному измерительному каналу (проводу).

Панель **сеть** позволяет выбрать электрическую сеть и соответственно установит способ учета электроэнергии:

- «4-х проводная сеть» - измерение электроэнергии в трехфазной трехпроводной сети с помощью трехэлементного счетчика;
- «3-х проводная сеть» - измерение электроэнергии в трехфазной трехпроводной сети с помощью двухэлементного счетчика.

Панель **ввод данных** позволяет задать параметры режима первичной сети, в частности фазные напряжения и токи, а также её номинальное напряжение.

Кнопка **«Рассчитать»** приводит к моделированию работы счетчика электроэнергии согласно заданной схеме подключения.

Кнопка **«Сбросить параметры»** приводит к сбросу всех заданных и выбранных подключений, а также прекращению моделирования работы счетчика электроэнергии.

Кроме вышеописанных панелей на виртуальном стенде отображаются векторные диаграммы токов и напряжений, имеющих место на обмотках счетчика электроэнергии. Значения мощностей отдельно по фазам и суммарная трехфазная мощность, передаваемая по сети, и измеряемая счетчиком электроэнергии. Значения расчетных коэффициентов по активной, реактивной и полной мощностям.

### 6.3. Подготовка к лабораторной работе

Подготовка к лабораторной работе предусматривает: ознакомление с теоретическим материалом по теме лабораторной работы; изучением описания виртуального лабораторного стенда; домашнюю заготовку таблиц для занесения результатов измерений (табл. 6.1). В табл. 6.1  $P$  - измеряемая счетчиком электроэнергии активная трехфазная мощность.  $Q$  - измеряемая счетчиком электроэнергии трехфазная реактивная мощность.  $S$  - измеряемая счетчиком электроэнергии полная трехфазная мощность.  $K_i$  ( $i = P, Q, S$ ) – соответствующие расчетные коэффициенты для суммарной трехфазной мощности.

Таблица 6.1 – Измеряемые мощности и расчетные коэффициенты

Схема	$P$ , Вт	$K_P$	$Q$ , вар	$K_Q$	$S$ , ВА	$K_S$	Векторная диаграмма токов и напряжений
1	2	3	4	5	6	7	8

### 6.4. Порядок выполнения лабораторной работы

Допуском к выполнению лабораторной работы является домашняя подготовка к выполнению работы.

В ходе лабораторной работы необходимо выполнить десять опытов, среди которых обязательное подключение счетчика электроэнергии по схеме, представленной на рис.6.1, и девять опытов с произвольными подключениями.

В рамках каждого опыта необходимо:

3. Записать в табл. 6.1 значения измеряемых трехфазных мощностей и расчетные коэффициенты.

4. Построить векторные диаграммы токов и напряжений, характеризующие каждую схему подключения (табл. 6.1)

### **6.5. Оформление отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать следующее:

5. Цель работы, схему подключения счетчика к трехфазной трехпроводной сети;
6. Результаты измерений;
7. Векторные диаграммы напряжений и токов по каждой схеме подключения;
8. Выводы по работе.

### **6.6. Вопросы**

7. В чем заключается способ учета электрической энергии в трехфазной трехпроводной сети?
8. Изобразите правильную схему подключения счетчика электроэнергии к трехфазной трехпроводной сети.
9. Дайте характеристику векторной диаграмме токов и напряжений при правильной схеме подключения счетчика электроэнергии.
10. Дайте характеристику векторной диаграмме токов и напряжений одной из неправильных схем подключения счетчика электроэнергии.
11. Укажите недостатки учета электрической энергии при подключении счетчика электроэнергии по двухэлементной схеме.

### **6.7. Литература**

3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М., «Высш. школа», 1973.
4. Вострокнутов Н.Г. Электрические счетчики и их эксплуатация. М. 1947.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7**  
**ИССЛЕДОВАНИЕ НА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПЕРЕХОДНЫХ**  
**ПРОЦЕССОВ В ПРОСТЕЙШИХ ТРЕХФАЗНЫХ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫХ**  
**ЦЕПЯХ С ИСТОЧНИКАМИ БЕСКОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ**  
(дисциплина «Переходные процессы в энергетических системах»)

**Цель работы:** Определение характера изменения тока трехфазного короткого замыкания и его составляющих в зависимости от момента КЗ и соотношения активных и реактивных сопротивлений цепи.

**7.1. Указания по подготовке к работе**

1. Изучить теорию переходных процессов при коротких замыканиях в радиальной сети без трансформаторных связей. Литература [1] стр. 82- 90 или [4] стр. 111-114.
2. Изучить основные сведения о работе в среде Simulink. Литература [2] стр. 21- 37 или [6] стр. 11-32.
3. Ознакомиться со структурной схемой математической модели цепи с источником бесконечной мощности (Рис.1.3).
4. Составить уравнения соответствующие структурной схеме математической модели.

**7.2. Краткие пояснения к работе**

В лабораторной работе исследуется простая симметричная трехфазная цепь с активно-индуктивным сопротивлением цепи короткого замыкания (рис.1.1), что характерно для большинства реальных электрических сетей. Цепь питается от источника, у которого в нормальном режиме работы и при КЗ на зажимах сохраняется симметричная и неизменная по значению трехфазная система напряжений.

Изменение режима в цепи, содержащей источник питания, при наличии индуктивности сопровождается переходным процессом. Уравнение, описывающее этот процесс:

$$u = ir_{\kappa} + L_{\kappa} \frac{di}{dt}$$

где  $u$  и  $i$  - соответственно мгновенные значения напряжения и тока рассматриваемой фазы. Решение, этого уравнения дает выражение для мгновенного значения тока в любой момент времени  $t$  от начала к. з.:

$$i_{kt} = \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + i_{ao} e^{-\frac{t}{T_a}}$$

Где  $U_m$ - амплитудное значение фазного напряжения источника;

$Z_k$ - полное сопротивление цепи КЗ;

$\alpha$  - фазовый угол напряжения источника в момент  $t=0$ ;

$\varphi$  -угол сдвига тока в цепи КЗ относительно напряжения источника той же фазы;

$T_a$ - постоянная времени цепи к. з.:

$$T_a = \frac{L_k}{r_k} = \frac{x_k}{\omega r_k}$$

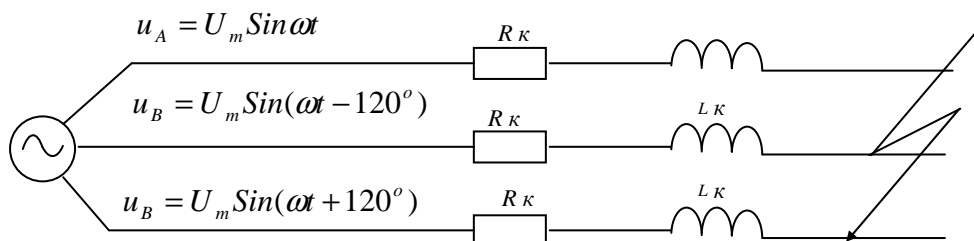


Рис. 7.1. Трехфазная симметричная цепь, питаемая от шин неизменного напряжения.

Полный ток КЗ состоит из двух составляющих:

-вынужденной, обусловленной действием напряжения источника;

-свободной, обусловленной изменением запаса энергии магнитного поля в индуктивности  $L_K$ .

Вынужденная составляющая тока КЗ имеет периодический характер с частотой, равной частоте напряжения источника. Называют эту составляющую обычно периодической составляющей тока КЗ.

$$i_{nt} = \frac{U_m}{Z_k} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) = I_{nm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$$

где  $I_{nm}$ - амплитудное значение периодической составляющей тока.

Свободная составляющая тока КЗ

$$i_{at} = i_{ao} e^{-\frac{t}{T_a}}$$

имеет аperiодический характер изменения, на основании чего эту составляющую называют аperiодической составляющей тока КЗ. Значение тока  $i_{ao}$  будет максимальным в случае, если напряжение в момент возникновения КЗ проходит через нулевое значение ( $\alpha = 0$ ), а тока в цепи КЗ нет ( $i_{(0)} = 0$ ). Кривая изменения тока, при условии максимального значения аperiодической составляющей тока, показана на рис. 7.2.

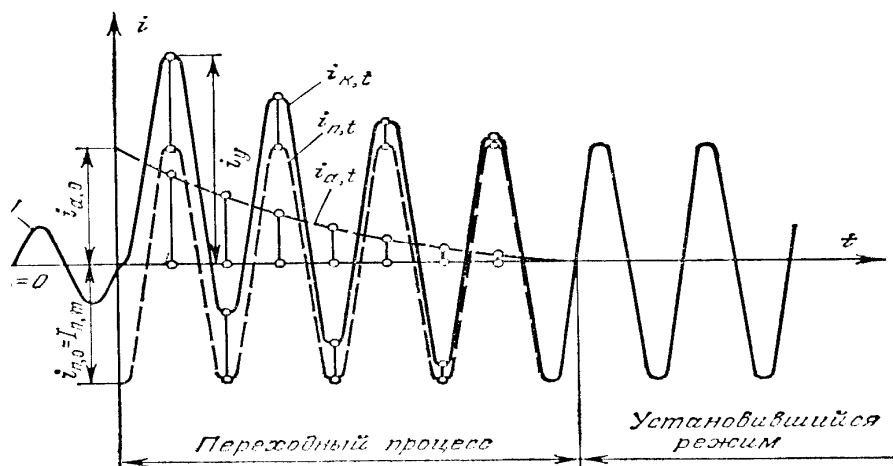


Рис. 7.2. Изменение тока КЗ в цепи, питаемой от шин неизменного напряжения при максимальном значении аperiодической составляющей

Переходный процесс заканчивается после затухания апериодической составляющей тока и далее полный ток КЗ равен его периодической составляющей, неизменной по амплитуде.

Максимальное мгновенное значение полного тока наступает обычно через 0,01с после возникновения КЗ. Оно называется ударным током и обозначается  $i_y$ .

$$i_y = \sqrt{2} k_y I_{no}$$

где  $k_y = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$

Исследование проводится на математической модели цепи с источником бесконечной мощности, структурная схема которой представлена на рис. 7.3.

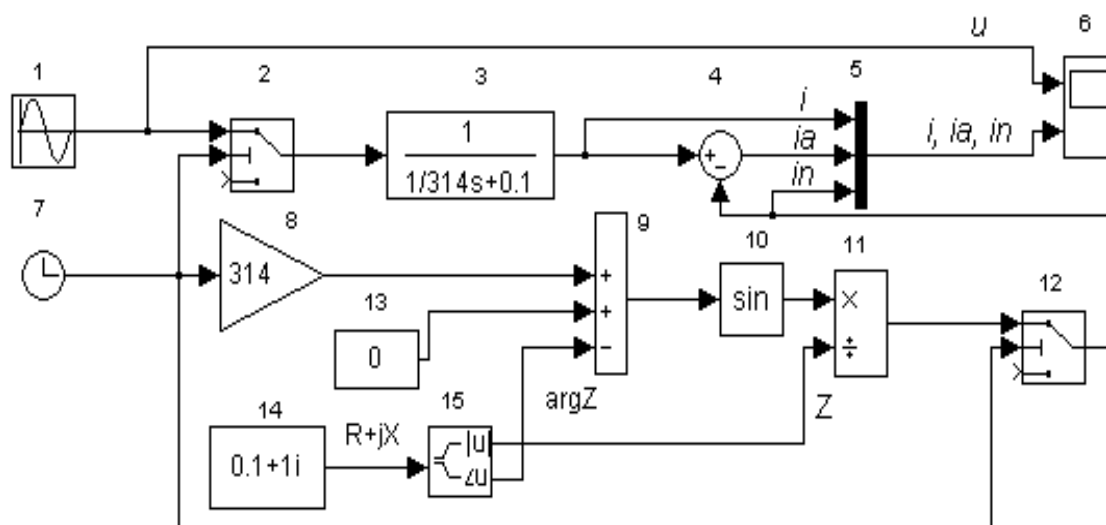


Рис. 7.3. Математическая модель цепи с источником бесконечной мощности. 1-источник синусоидального сигнала; 2 и 12-переключатели; 3- передаточная функция; 4 и 9-сумматоры; 5-мультиплексор- объединяет входные сигналы в вектор; 6-осциллограф; 7-источник времени; 8-усилитель; 10, 11 и 14-блоки математических операций; 13 и 14-источники постоянного сигнала.



На выходе первого элемента получаем мгновенное значение периодического напряжения постоянной амплитуды частотой 50Гц, не зависящего от тока КЗ. На выходе третьего элемента - мгновенное значение полного тока КЗ. Элементы 7-15 моделируют периодическую составляющую тока КЗ, отстающую от напряжения на угол, определяемый соотношением активного и индуктивного сопротивлений цепи КЗ. Эти сопротивления задаются параметрами 14-го элемента. Изменяя сопротивления в 14-м элементе, необходимо изменить эти же сопротивления в передаточной функции (элементе 3). На 13 элементе моделируем начальную фазу напряжения, которая должна совпадать с начальной фазой напряжения моделируемого в элементе 1. Аperiodическую составляющую тока КЗ получаем как разность полного тока КЗ и его периодической составляющей на выходе сумматора 4.

### **7.3. Порядок выполнения работы**

1. Составить математическую модель цепи с источником бесконечной мощности (рис. 7.3). Задать параметры источника синусоидального сигнала:

- амплитуда -1;
- постоянная составляющая сигнала-0;
- частота-314(рад/с);
- начальная фаза-0;
- такт дискретности-0.

Установить интервал моделирования от 0 до 0.08-0.12с.

2. Смоделировать трехфазное КЗ через 0.02с. работы источника напряжения в режиме холостого хода и снять осциллограммы напряжения, полного тока короткого замыкания его составляющих для фаз: А, В и С.

Для выполнения этого опыта необходимо в обоих переключателях задать сигнал управления равный 0.02с. Запустить модель. Установить курсор мыши на осциллограф и, щелкнув два раза левой клавишей, наблюдать переходный

процесс в фазе А. Создать документ в Word и сохранить в нем полученную осциллограмму.

Заменить поочередно фазу источника синусоидального сигнала и сигнал постоянного источника (13 элемент) на выражение  $2\pi/3$  и  $-2\pi/3$  получить осциллограммы напряжения, полного тока короткого замыкания его составляющих для фаз: В и С соответственно. Сохранить полученные осциллограммы документ в Word.

3. Выяснить влияние на характер тока КЗ и его составляющих, момента времени наступления КЗ, сняв осциллограммы токов для следующих случаев:

- короткое замыкание происходит в момент времени, когда напряжение проходит через ноль, возрастая;
- короткое замыкание происходит в момент времени, когда напряжение проходит через ноль, убывая;
- короткое замыкание происходит в момент времени, когда напряжение максимально;
- короткое замыкание происходит в момент времени, когда напряжение минимально.

Опыт провести для фазы А, задавая поочередно в обоих переключателях сигнал управления равный: 0.02, 0.01, 0.005 и 0.015.

4. Выяснить влияние на характер тока КЗ и его составляющих, соотношения активного и реактивного сопротивлений цепи КЗ, сняв осциллограммы для следующих случаев:

- активное сопротивление меньше реактивного в 10 раз;
- активное сопротивление меньше реактивного в 100 раз;
- активное сопротивление меньше реактивного в 1000 раз (индуктивная цепь);
- активное сопротивление больше реактивного в 100 раз (практически активная цепь).

Опыт провести для фазы А, изменяя соответствующим образом соотношения активного и реактивного сопротивлений.

## 7.4. Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. краткое описание работы;
2. математическую модель и ее краткое описание;
3. осциллограммы опытов;
4. анализ полученных результатов;
5. выводы.

## 7.5. Контрольные вопросы

1. Как изменяются полный ток и его составляющие при трехфазном КЗ в цепях с источником бесконечной мощности?
2. Причина возникновения апериодической составляющей тока КЗ.
3. В каких пределах изменяется постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ?
4. При каких условиях апериодическая составляющая тока КЗ будет максимальной?
5. Причина затухания апериодической составляющей тока КЗ.
6. От чего зависит интенсивность затухания апериодической составляющей тока КЗ?
7. Что происходит с апериодической составляющей тока КЗ за время  $t=Ta$ ?
8. Какова длительность затухания апериодической составляющей тока КЗ и от чего она зависит?
9. В каких цепях постоянная времени затухания апериодической составляющей тока КЗ будет максимальной, а в каких минимальной?
10. . В каких цепях апериодическая составляющая может не затухать и почему?

11. В какой момент времени после начала КЗ возникает самый большой ток?
12. Какой ток КЗ называется ударным и при каких условиях он будет максимальным?
13. От каких параметров зависит ударный коэффициент?
14. В каких пределах изменяется ударный коэффициент?
15. В каких цепях ударный коэффициент будет максимальным, в каких минимальным?
16. Какой вид КЗ называется симметричным и почему?
17. Когда наступает установившийся режим при КЗ в цепях с источником бесконечной мощности?

## **7.6. Литература**

1. Винославский В.Н., Пивняк Г.Г. и др. Переходные процессы в системах электроснабжения.– М.: Энергоатомиздат, 2003. – 550с.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab.-6.0.- С–Пб.: Корона принт, 2001. – 320с.
3. Дьяков А. Ф. Гибридные тренажеры в энергетике. – Москва: МЭИ, 1994. 212с.
4. Рожкова Л.Д. Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. – М: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
5. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М: Энергия, 1970. – 520 с.
6. Черных И.В. Simulink среда создания инженерных приложений. М: Диалог МИФИ, 2004. 490с.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8**  
**РАСЧЕТЫ НЕСИММЕТРИЧНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В**  
**КАБЕЛЬНЫХ И ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**  
**(дисциплина «Кабельные и воздушные линии электропередачи»)**

**Цель работы:** Закрепление знаний по правилу эквивалентности прямой последовательности и соотношениям между симметричными составляющими токов и напряжений при несимметричных коротких замыканиях.

**8.1.Указания по подготовке к работе**

1. Изучить теорию по применению метода симметричных составляющих к расчету несимметричных коротких замыканий. Литература [1] стр. 182- 185.

2. Изучить правило эквивалентности для тока прямой последовательности. Литература [1] стр. 227- 232 или [6] стр. 325-329.

3. Ознакомиться со структурной схемой математической модели для расчета токов и напряжений всех последовательностей особой фазы при различных видах несимметричных коротких замыканий (рис.4.2).

4. Составить таблицу по определению токов обратной и нулевой последовательностей особой фазы при различных видах КЗ через ток прямой последовательности.

5. Составить таблицу по определению напряжений обратной и нулевой последовательностей особой фазы при различных видах КЗ через напряжение прямой последовательности.

6. Заполнить бланк переключений ручных переключателей.

Вид короткого замыкания	Положение переключателей								
	2	4	5	6	17	21	26	27	29
Однофазное									
Двухфазное									
Двухфазное КЗ на землю									

## 8.2. Краткие пояснения к работе

Сравнительно просто несимметричные КЗ, как и другие несимметричные режимы в электрических сетях можно рассчитывать с использованием метода симметричных составляющих. Идея этого метода состоит в том, что любую несимметричную систему трех векторов можно разложить на три симметричные системы: прямой, обратной и нулевой последовательностей. Для каждой из этих систем явления в фазах подобны, что позволяет воспользоваться однолинейными схемами для каждой последовательности и вести расчет для одной фазы. Такая фаза находится в условиях, отличающихся от условий для двух других фаз, и называется особой. Любой из векторов симметричной трехфазной системы можно представить одноименным вектором другой фазы с помощью оператора поворота  $a$ .

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ}$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j240^\circ} = e^{-j120^\circ}$$

Умножение вектора на оператор  $a$ , означает поворот его на  $120^\circ$  в положительном направлении (против хода часовой стрелки). Умножение на  $a^2$  соответствует повороту на  $240^\circ$  в том же направлении или на  $120^\circ$  в противоположном направлении.

В симметричной трехфазной системе (рис.4.1) каждый из векторов можно представить следующим образом:

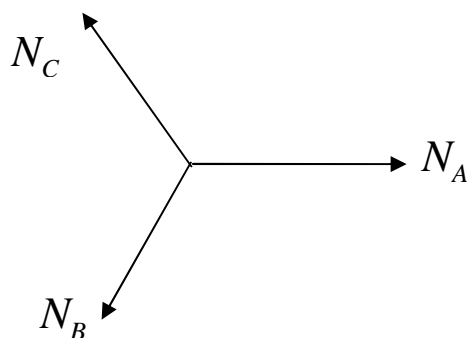


Рис. 8.1. Симметричная трехфазная система векторов.

$$\left. \begin{aligned} N_A &= aN_B = a^2 N_C \\ N_B &= aN_C = a^2 N_A \\ N_C &= aN_A = a^2 N_B \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

Система прямой последовательности состоит из трех одинаковых векторов, сдвинутых друг относительно друга на  $120^\circ$  и чередующихся в такой же последовательности, как и основная симметричная система(). Эта система обозначается индексом 1 .

Система обратной последовательности также состоит из трех одинаковых векторов, сдвинутых друг относительно друга на  $120^\circ$ , но чередование этих векторов противоположное основной симметричной системе. Эта система обозначается индексом 2.

Поскольку векторы системы прямой (обратной) последовательности в сумме равны нулю, эти системы являются уравновешенными:

Система нулевой последовательности состоит из трех одинаковых векторов, совпадающих по направлению эта система векторов обозначается индексом 0. Система нулевой последовательности симметрична, но не уравновешена:

По составляющим прямой, обратной и нулевой последовательностей можно восстановить исходную несимметричную систему:

$$\left. \begin{aligned} N_A &= N_{A1} + N_{A2} + N_{A0} \\ N_B &= N_{B1} + N_{B2} + N_{B0} \\ N_C &= N_{C1} + N_{C2} + N_{C0} \end{aligned} \right\} \quad (8.2)$$

Симметричную систему фазных векторов можно выразить через симметричные составляющие особой фазы

$$\left. \begin{aligned} N_A &= N_{A1} + N_{A2} + N_{A0} \\ N_B &= a^2 N_{A1} + a N_{A2} + N_{A0} \\ N_C &= a N_{A1} + a^2 N_{A2} + N_{A0} \end{aligned} \right\} \quad (8.3)$$

Уравнения (4.4) позволяют выделить из несимметричной системы симметричные составляющие.

$$\left. \begin{aligned} N_{A1} &= (N_A + a N_B + a^2 N_C) / 3 \\ N_{A2} &= (N_A + a^2 N_B + a N_C) / 3 \\ N_{A0} &= (N_A + N_B + N_C) / 3 \end{aligned} \right\} \quad (8.4)$$

Ток прямой последовательности особой фазы  $I_{к, A1}^{(n)}$  в соответствии с правилом эквивалентности прямой последовательности определяется по формуле.

$$I_{к, A1}^{(n)} = \frac{E_{1\text{рез}}}{x_{1\text{рез}} + \Delta x^{(n)}},$$

где  $\Delta x^{(n)}$  - дополнительное индуктивное сопротивление. Значения  $\Delta x^{(n)}$  для различных видов КЗ приведены в таблице 8.1.

Модуль тока поврежденной фазы в  $кА$  по формуле:



$$I_{\text{к}}^{(n)} = m^{(n)} \cdot I_{\text{к, А1}}^{(n)} \cdot I_{\text{б}},$$

где  $m^{(n)}$ -коэффициент, показывающий во сколько раз модуль тока поврежденной фазы в месте КЗ больше модуля тока прямой последовательности.

Значения коэффициентов  $m^{(n)}$  для различных видов КЗ приведены в таблице 8.1.

Таблица 8.1.

Вид КЗ	Дополнительное сопротивление $x_{\Delta}^{(n)}$	Значение коэффициента $m^{(n)}$
Двухфазное	$x_{2 \text{ рез}}$	$\sqrt{3}$
Однофазное	$x_{2 \text{ рез}} + x_{0 \text{ рез}}$	3
Двухфазное на землю	$\frac{x_{2 \text{ рез}} \cdot x_{0 \text{ рез}}}{x_{2 \text{ рез}} + x_{0 \text{ рез}}}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{2 \text{ рез}} \cdot x_{0 \text{ рез}}}{(x_{2 \text{ рез}} + x_{0 \text{ рез}})^2}}$

Выражения для симметричных составляющих токов и напряжений через ток прямой последовательности для различных КЗ приведены в таблице 8.2

Таблица 8.2.

Расчетные величины и их обозначения		Вид КЗ		
		Однофазное	Двухфазное	Двухфазное на землю
Ток обратной последовательности	$\dot{I}_{A2}$	$\dot{I}_{A1}$	$-\dot{I}_{A1}$	$-\dot{I}_{A1} \frac{x_{0\text{ пез}}}{(x_{0\text{ пез}} + x_{2\text{ пез}})}$
Ток нулевой последовательности	$\dot{I}_{A0}$	$\dot{I}_{A1}$	0	$-\dot{I}_{A1} \frac{x_{2\text{ пез}}}{(x_{0\text{ пез}} + x_{2\text{ пез}})}$
Ток фазы А	$\dot{I}_A$	$3\dot{I}_{A1}$	0	0
Ток фазы В	$\dot{I}_B$	0	$a^2 \dot{I}_{A1} - a \dot{I}_{A1}$	$\dot{I}_{A1} (a^2 - \frac{ajx_{0\text{ пез}} + jx_{2\text{ пез}}}{j(x_{0\text{ пез}} + x_{2\text{ пез}})})$
Ток фазы С	$\dot{I}_C$	0	$a^2 \dot{I}_{A1} - a^2 \dot{I}_{A1}$	$\dot{I}_{A1} (a - \frac{a^2 jx_{0\text{ пез}} + jx_{2\text{ пез}}}{j(x_{0\text{ пез}} + x_{2\text{ пез}})})$
Напряжение прямой последовательности	$\dot{U}_{A1}$	$j(x_{0\text{ пез}} + x_{2\text{ пез}}) \dot{I}_{A1}$	$jx_{2\text{ пез}} \dot{I}_{A1}$	$j \frac{x_{2\text{ пез}} \cdot x_{0\text{ пез}}}{x_{2\text{ пез}} + x_{0\text{ пез}}} \cdot \dot{I}_{A1}$
Напряжение обратной последовательности	$\dot{U}_{A2}$	$-jx_{2\text{ пез}} \dot{I}_{A1}$	$jx_{2\text{ пез}} \dot{I}_{A1}$	$j \frac{x_{2\text{ пез}} \cdot x_{0\text{ пез}}}{x_{2\text{ пез}} + x_{0\text{ пез}}} \cdot \dot{I}_{A1}$
Напряжение нулевой последовательности	$\dot{U}_{A0}$	$-jx_{0\text{ пез}} \dot{I}_{A1}$	0	$j \frac{x_{2\text{ пез}} \cdot x_{0\text{ пез}}}{x_{2\text{ пез}} + x_{0\text{ пез}}} \cdot \dot{I}_{A1}$
Напряжение фазы А	$\dot{U}_A$	0	$2\dot{I}_{A1} jx_{2\text{ пез}}$	$3\dot{I}_{A1} \frac{jx_{2\text{ пез}} \cdot x_{0\text{ пез}}}{x_{2\text{ пез}} + x_{0\text{ пез}}}$
Напряжение фазы В	$\dot{U}_B$	$\dot{I}_{A1} j[x_{2\text{ пез}}(a^2 - a) + x_{0\text{ пез}}(a^2 - 1)]$	$-\dot{I}_{A1} jx_{2\text{ пез}}$	0
Напряжение фазы С	$\dot{U}_C$	$\dot{I}_{A1} j[x_{2\text{ пез}}(a - a^2) + x_{0\text{ пез}}(a - 1)]$	$-\dot{I}_{A1} jx_{2\text{ пез}}$	0

### 8.3. Порядок выполнения работы

1. Составить математическую модель для расчета токов и напряжений всех последовательностей особой фазы при различных видах несимметричных коротких замыканий (рис. 8.2).

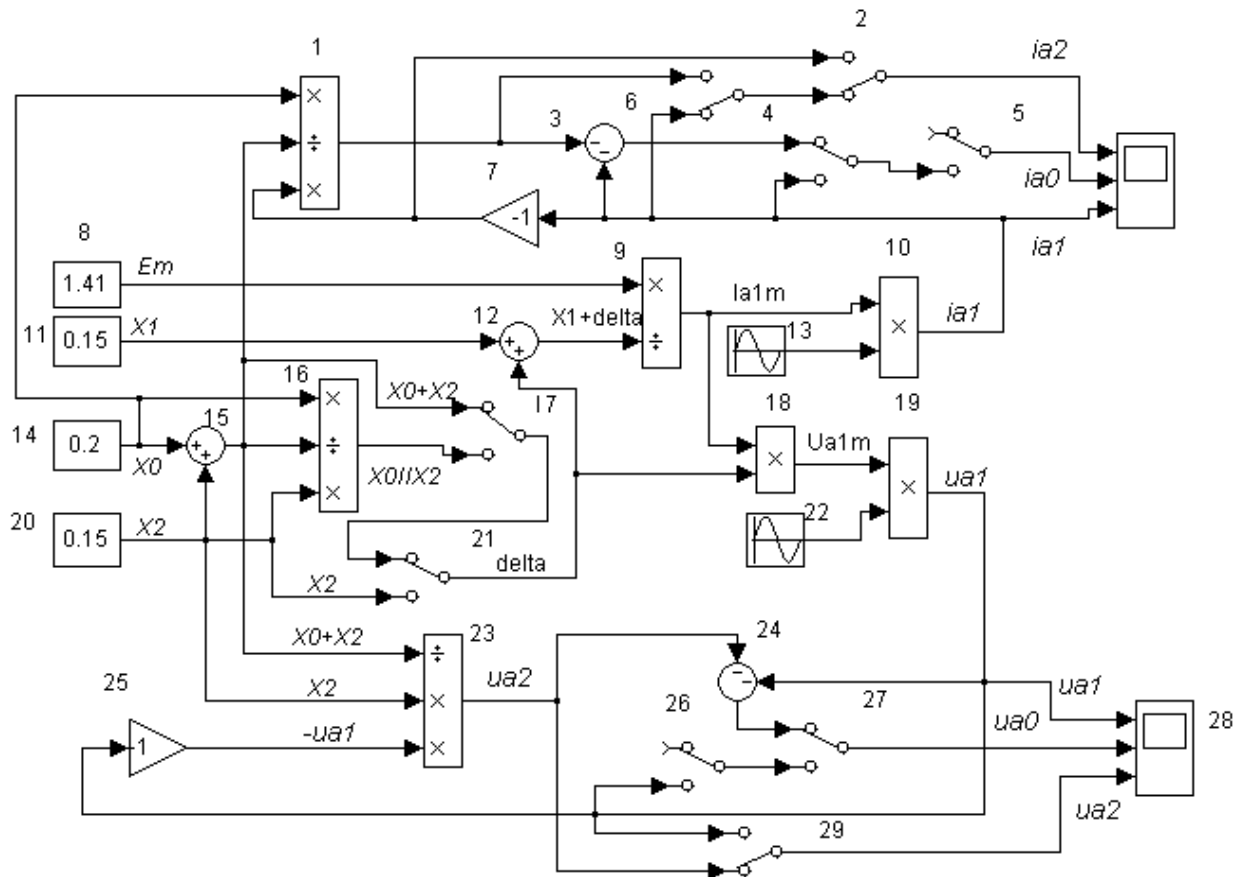


Рис. 8.2. Математическая модель для расчета токов и напряжений всех последовательностей особой фазы при различных видах несимметричных коротких замыканий

С помощью элементов 11, 14 и 20 моделируем результирующие индуктивные сопротивления прямой ( $X1$ ), обратной ( $X2$ ) и нулевой ( $X0$ ) последовательностей. Элементы 15, 16 и ручные переключатели 17, 21 позволяют получить сопротивление шунта  $x_{\Delta}^{(n)}$  (на модели delta) для различных видов несимметричных КЗ. На выходах элементов 10 и 19 получаем мгновенные значения тока ( $i_{a1}$ ) и напряжения ( $u_{a1}$ ) прямой

последовательности особой фазы. С помощью элементов 1, 3, 7 и ручных переключателей 2, 4, 5, 6 моделируем мгновенные значения токов обратной ( $i_{a2}$ ) и нулевой ( $i_{a0}$ ) последовательностей особой фазы для различных видов несимметричных КЗ. Элементы 23, 24, 25 и ручные переключатели 26, 27, 29 позволяют получить) мгновенные значения напряжений обратной ( $u_{a2}$ ) и нулевой ( $u_{a0}$ ) последовательностей особой фазы для различных видов несимметричных КЗ.

2. Получить осциллограммы токов и напряжений всех последовательностей особой фазы при однофазном КЗ.

Для выполнения опыта необходимо ручные переключатели установить в такое положение, чтобы сопротивление шунта было равно  $X_{\Delta}^1 = X_{2рез} + X_{0рез}$ , токи всех последовательностей равны, а между напряжениями выполнялось соотношение  $U_{A1} = -U_{A2} - U_{A0}$ . Переключение осуществляется двойным щелчком левой клавиши мыши на соответствующем ручном переключателе. На модели X2 соответствует  $X_{2рез}$ , X0 соответствует  $X_{0рез}$ .

3. Провести аналогичные опыты при двухфазном и двухфазном коротком замыкании на землю.

4. Получить осциллограммы токов и напряжений особой фазы фаз при различных коротких замыканиях.

5. Вывести на виртуальный дисплей модули токов поврежденных фаз при различных коротких замыканиях.

Примечание: При проведении четвертого и пятого опытов необходимо подключить дополнительно осциллографы и дисплеи к соответствующим выходам модели и ввести дополнительные элементы.

## 8.4.Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. краткое описание работы;

2. математическую модель и ее краткое описание;
3. осциллограммы опытов;
4. анализ полученных результатов;
5. выводы.

### **8.5. Контрольные вопросы**

1. Виды несимметричных коротких замыканий.
2. Суть метода симметричных составляющих.
3. Что представляет собой прямая система трех векторов?
4. Что представляет собой обратная система трех векторов?
5. Что представляет собой нулевая система трех векторов?
6. Как разложить несимметричную систему трех векторов на симметричные составляющие?
7. Чему равен оператор поворота?
8. Что произойдет с вектором, если его умножить на оператор поворота?
9. Сформулировать правило эквивалентности прямой последовательности.
10. Что называется особой фазой?
11. Выразить через ток прямой последовательности особой фазы токи и напряжения других последовательностей.
12. Чему равно сопротивление шунта при различных видах коротких замыканий?
13. Как выразить модули токов поврежденных фаз при различных видах коротких замыканий через ток прямой последовательности особой фазы?
14. Чему равен коэффициент  $m^{(n)}$  при различных видах коротких замыканий?
15. Что такое поперечная несимметрия?

## **8.6. Литература**

1. Винославский В.Н., Пивняк Г.Г. и др. Переходные процессы в системах электроснабжения.– М: Энергоатомиздат,2003. – 550с.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab.-6.0.- С – Пб: Корона принт, 2001. – 320с.
3. Дьяков А. Ф. Гибридные тренажеры в энергетике. – М.: МЭИ, 1994. 212с.
4. Рожкова Л.Д. Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. – М: Энергоатомиздат,1987. – 648 с.
5. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М: Энергия,1970. –520 с.
6. Черных И.В. Simulink среда создания инженерных приложений. М: Диалог МИФИ, 2004. 490с.

**ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9**  
**МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ В**  
**ПРОСТЕЙШИХ ТРЕХФАЗНЫХ НЕРАЗВЕТВЛЕННЫХ ЦЕПЯХ**  
(дисциплина «Релейная защита и автоматика»)

Цель работы: Определение характера изменения тока трехфазного короткого замыкания и его составляющих в зависимости от удаленности точки КЗ от генератора и значения величины постоянной времени обмотки возбуждения  $T_f$  для анализа работы релейной защиты.

**9.1. Указания по подготовке к работе**

1. Изучить режим работы релейной защиты при коротких замыканиях в радиальной сети с генераторами ограниченной мощности.

Рекомендуемая литература [1] стр. 91- 96 или [4] стр. 115-121.

2. Ознакомиться со структурными схемой математической моделей цепи с генератором ограниченной мощности без регулятора возбуждения (рис. 2.3.

3. Составить уравнения соответствующие структурной схеме математической модели.

**9.2. Краткие пояснения к работе**

В лабораторной работе исследуется простая симметричная трехфазная цепь с активно-индуктивным сопротивлением цепи короткого замыкания. Цепь питается от источника ограниченной мощности. В отличии от первой лабораторной работы в данной работе рассматриваются такие повреждения, при которых сопротивления короткого замыкания одного порядка с сопротивлением генератора.

При малой электрической удаленности места повреждения существенное влияние на переходный процесс оказывает АРВ генератора. Для упрощения

сначала рассматривается генератор с отключенным АРВ. В такой машине вынужденный ток возбуждения остается постоянным и обеспечивает неизменный магнитный поток возбуждения.

На рис. 9.1 показан генератор, питающий простую трехфазную цепь.. Основная особенность данного случая состоит в том, что параметры генератора и их изменение в переходном режиме существенно влияют на ход процесса короткого замыкания.

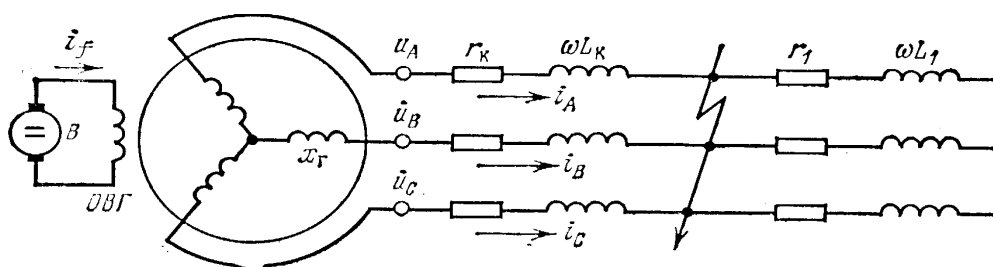


Рис. 9.1. Трехфазная симметричная цепь, питаемая от синхронного генератора.

На рис. 9.2, приведена кривая изменения полного тока КЗ, и его составляющие в одной фазе цепи, питаемой от генератора без АРВ. Момент возникновения КЗ соответствует случаю, когда апериодическая составляющая тока и полный ток достигают максимального значения.

При холостом ходе, под действием тока ротора, в машине наводится магнитный поток возбуждения  $\Phi_d$ . В момент возникновения КЗ в статоре генератора появляется ток. Периодическая составляющая тока отстает от напряжения на выводах генератора на угол  $\varphi_k$ , определяемый параметрами цепи КЗ. Протекая по обмоткам генератора, периодическая составляющая тока создает магнитный поток  $\Phi_{ad}$ , который будет направлен встречно потоку возбуждения  $\Phi_d$  как поток реакции якоря по продольной оси ротора.



На пути потока  $\Phi_{ad}$  находятся два проводящих контура: короткозамкнутый контур демпферной обмотки (только у гидрогенераторов) и замкнутый на возбудитель контур обмотки возбуждения.

Контуры демпферной обмотки и обмотки возбуждения обладают индуктивностью, в которой под действием  $\Phi_{ad}$  наводятся ЭДС и возникают свободные токи соответственно  $i_{c\delta}$  и  $i_{cef}$ . Поток  $\Phi_{ad}$  неподвижен относительно ротора, поэтому токи  $i_{c\delta}$  и  $i_{cef}$  имеют апериодический характер, если не учитывать апериодическую составляющую тока КЗ.

Указанные апериодические токи затухают с постоянно времени, равной отношению индуктивности контура к его активному сопротивлению. Им соответствуют свободные магнитные потоки обмоток: демпферной  $\Phi_{c\delta}$  и возбуждения  $\Phi_{cef}$ .

Так как магнитный поток ротора не может изменяться скачком, то для момента времени  $t=0$  должно выполняться условие  $\Phi_{ad} = \Phi_{c\delta} + \Phi_{cef}$

Таким образом, в начальный момент КЗ поток  $\Phi_{ad}$  в роторе компенсируется свободными потоками и в воздушном зазоре генератора действует результирующий магнитный поток  $\Phi_{рез}$  равный  $\Phi_d$ , т.е.

$$\Phi_{рез} = \Phi_d + \Phi_{cef} + \Phi_{c\delta} - \Phi_{ad} = \Phi_d$$

С течением времени происходит затухание апериодических токов в демпферной обмотке и обмотке возбуждения с одновременным уменьшением соответствующих магнитных потоков  $\Phi_{c\delta}$  и  $\Phi_{cef}$ , причем первым затухает магнитный поток  $\Phi_{c\delta}$  в цепи обмотки возбуждения, имеющей малое активное сопротивление, свободный ток затухает медленнее.

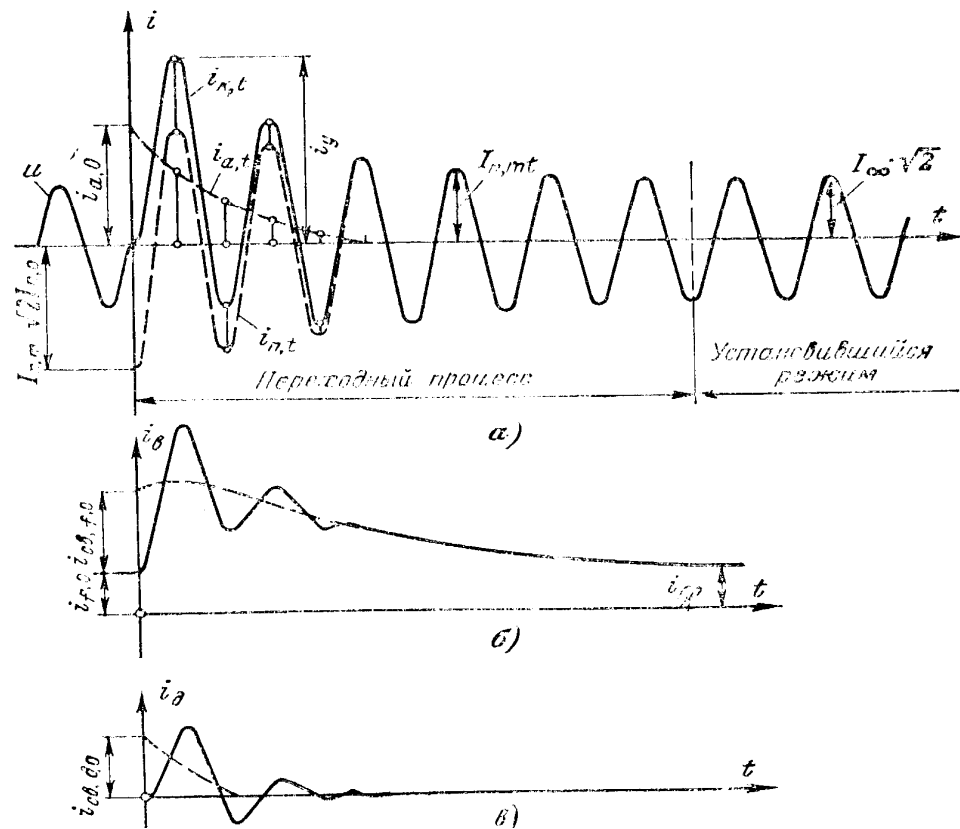


Рис. 9.2. Кривые изменения тока КЗ. синхронного генератора при отсутствии автоматического регулятора возбуждения.

Свободные магнитные потоки уже не могут компенсировать размагничивающее действие потока реакции статора  $\Phi_{ad}$ , вследствие чего происходит уменьшение ЭДС генератора. Это уменьшение приводит к тому, что периодическая составляющая тока КЗ также уменьшается.

Магнитный поток, созданный аperiodической составляющей тока КЗ, перемещается относительно ротора и наводит в его обмотках периодические токи.

После затухания свободных токов в демпферной обмотке и в обмотке возбуждения наступает установившийся режим для периодической составляющей тока статора. Результирующий магнитный поток при этом равен:

$$\Phi_{рез} = \Phi_d - \Phi_{ad}$$

т. е. размагничивающее действие потока статора максимально.

Следует, правда, учесть, что магнитный поток  $\Phi_{ad}$  несколько уменьшается по сравнению с начальным моментом вследствие уменьшения периодической составляющей тока КЗ.

Таким образом, при отсутствии на генераторе АРВ установившееся значение периодической составляющей тока КЗ оказывается меньше его начального значения,

Апериодическая составляющая тока КЗ затухает по экспоненте с постоянной времени  $T_a$ . В рассматриваемом случае сопротивления цепи КЗ и генератора соизмеримы, поэтому при вычислении  $T_a$  необходимо учитывать соответствующие сопротивления обмотки статора.

Исследование переходных процессов при отсутствии у генератора АРВ проводится на математической модели цепи, структурная схема которой представлена на рис. 9.3.

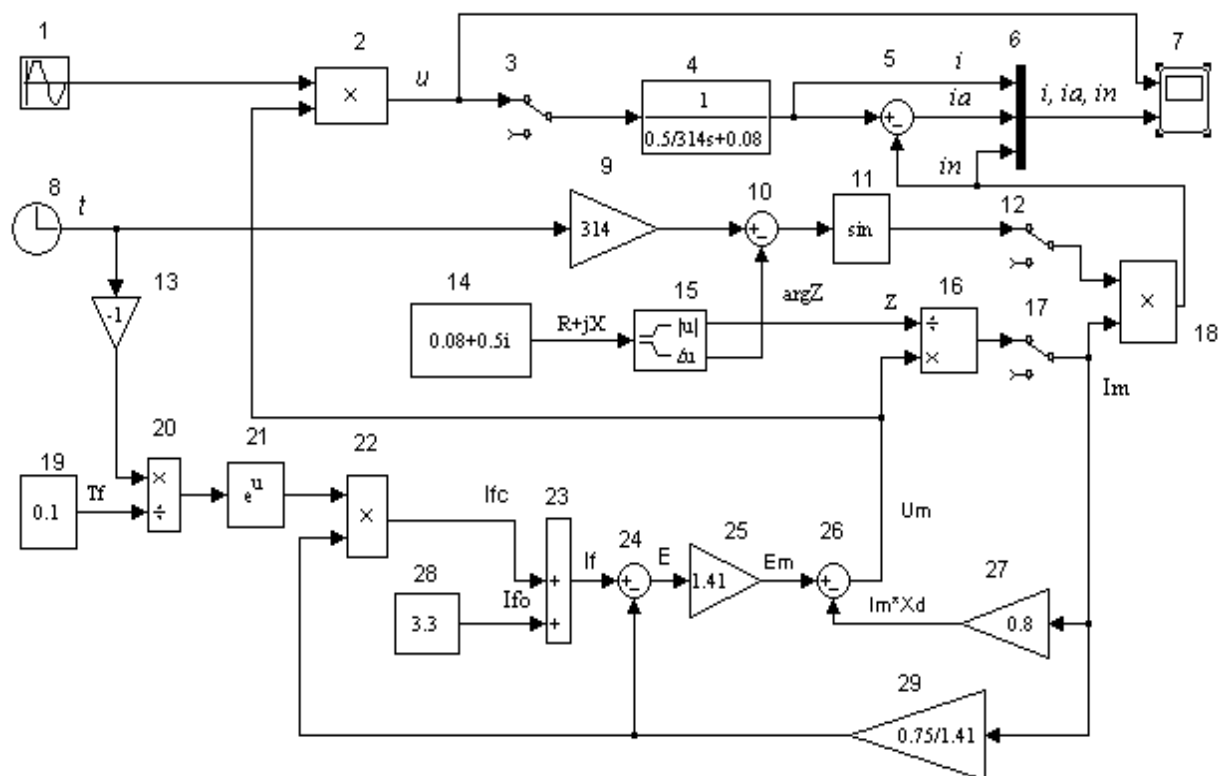


Рис. 9.3. Математическая модель цепи с генератором ограниченной мощности без регулятора возбуждения

В данной математической модели отсутствуют переключатели, так как считаем, что КЗ происходит в нулевой момент времени. Сигнал на выходе 2-го элемента имитирует мгновенное значение напряжения на шинах генератора, которое зависит от тока в цепи статора. Элементы 8, 13, 19-22 моделируют изменение свободного тока в обмотке возбуждения  $I_{fc}$ . Источник постоянного сигнала 28 обеспечивает начальное значение тока в обмотке возбуждения  $I_{fo}$ . Полный ток протекающий в обмотке возбуждения  $I_f$  получаем на выходе сумматора 23. ЭДС генератора в относительных единицах принята равной результирующему потокосцеплению в воздушном зазоре (на выходе сумматора 24), т.е. не учитываем насыщение генератора. На усилителе 27 моделируется падение напряжения в обмотке статора генератора, а на 29- поток реакции статора, который в начальный момент компенсируется магнитным потоком ротора, вызванным возникшим свободным током в обмотке возбуждения  $I_{fo}$ . Ручные переключатели 3, 12, 17 позволяют произвести переключения необходимые при проведении опытов.

### 9.3. Порядок выполнения работы

1. Составить математическую модель цепи питающейся от генератора ограниченной мощности без регулятора возбуждения (рис. 9.3).
2. Снять осциллограммы мгновенного значения напряжения генератора и токов в обмотках статора и ротора в режиме холостого хода для чего перевести ручные переключатели в нулевое положение.
3. Снять осциллограммы напряжения генератора, полного тока КЗ и его составляющих, а так же токи в обмотке возбуждения. Величины сопротивлений короткого замыкания задает преподаватель. Опыт провести для 2-3 значений сопротивлений.

Примечание: При проведении второго и третьего опытов необходимо подключить дополнительно осциллографы к соответствующим выходам модели.

4. Меняя значения постоянной времени обмотки возбуждения  $T_f$  (элемент 19), выяснить ее влияние на характер изменения тока КЗ и его составляющих.

5. Создать документ в Word и сохранить в нем все полученные осциллограммы.

#### **9.4. Содержание отчета**

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

1. краткое описание работы;
2. математическую модель и ее краткое описание;
3. осциллограммы опытов;
4. анализ полученных результатов;
5. выводы.

#### **9.6. Контрольные вопросы**

1. Как изменяются полный ток и его составляющие при трехфазном КЗ на зажимах генератора без АРВ?

2. Почему происходит изменение периодической составляющей тока КЗ при коротком замыкании на шинах генератора?

3. Когда наступает установившийся режим при КЗ в цепях с генератором ограниченной мощности без АРВ?

4. Причина затухания периодической составляющей тока КЗ.

5. Почему в начальный момент КЗ не сказывается действие потока реакции статора?

6. На что влияет постоянная времени обмотки возбуждения?

## 9.7. Литература

1. Винославский В.Н., Пивняк Г.Г. и др. Переходные процессы в системах электроснабжения.– М.: Энергоатомиздат, 2003. – 550с.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в Matlab.-6.0.- С–Пб.: Корона принт, 2001. – 320с.
3. Дьяков А. Ф. Гибридные тренажеры в энергетике. – М.: МЭИ, 1994. 212с.
4. Рожкова Л.Д. Козулин В.С. Электрооборудование станций и подстанций. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 648 с.
5. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы. – М.: Энергия, 1970. – 520 с.
6. Черных И.В. Simulink среда создания инженерных приложений. М.: Диалог МИФИ, 2004. 490с.

**УЧЕБНОЕ ИЗДАНИЕ**  
**К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**  
**ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ**  
**«ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ»**  
**ЧАСТЬ I**

(для студентов дневной и заочной форм обучения специальности 7.090603 –  
«Электротехнические системы электропотребления»)

Составители: Олег Герасимович Гриб, Оксана Николаевна Довгалюк,  
Геннадий Аркадиевич Сендерович, Петр Павлович Рожков,  
Дмитрий Николаевич Калюжный, Галина Викторовна Омеляненко,  
Полина Геннадиевна Щербакова, Александр Иванович Колбасин,  
Ирина Григорьевна Натарова, Татьяна Витальевна Блощенко

Ответственный за выпуск: О. Г. Гриб

План 2008, (дополнительно)

---

Подп. к печати 02.06.08	Формат 60 × 84 1/16	Бумага офисный
Печать на ризографе.	Усл.. – печ. л. 3,6	Уч. – изд.. л., 4,0
Тираж 100 экз.	Зак. №	

---

61002, Харьков, ХНАГХ, ул. Революции, 12.

---

Сектор оперативной полиграфии ИВЦ ХНАГХ

61002, Харьков, ул. Революции, 12.